



Universidade de Aveiro
2016

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Patrícia Carvalho
Pereira**

**Desenvolvimento de novas soluções para aquisição
de dados batimétricos**



**Patrícia Carvalho
Pereira**

**Desenvolvimento de novas soluções para aquisição
de dados batimétricos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e Zonas Costeiras, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e coorientação do Doutor Paulo Renato Enes Baganha Baptista, Investigador Auxiliar do CESAM.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto RAIA (*Observatorio oceánico del margen Ibérico*, POCTEP-FEDER, 0520_-RAIA_CO_1_E) e no âmbito das atividades englobadas no Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM), Ref^a UID/AMB/50017/2013, cofinanciado pela FCT/MEC através de fundos nacionais, e pelo FEDER, no âmbito do Acordo de Parceria PT2020, e Compete 2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI).

o júri

o presidente

**Professora Doutora Filomena Maria Cardoso Pedrosa
Ferreira Martins**

Professora Associada, Departamento de Ambiente e
Ordenamento da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Jesus Manuel Pedreira Dubert

Professor Auxiliar, Departamento de Física da Universidade
de Aveiro

Doutor Paulo Renato Enes Baganha Baptista

Investigador Auxiliar, Centro de Estudos do Ambiente e do
Mar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Paulo Silva, orientador científico da presente tese, o meu profundo agradecimento por toda a orientação, disponibilidade e acompanhamento incansáveis ao longo deste processo.

Ao Professor Paulo Baptista, como coorientador, agradeço reconhecidamente toda a colaboração, apoio e conselhos na realização deste trabalho.

Ao Professor Telmo Cunha, quero agradecer as preciosas ajudas e partilhas de conhecimento.

A todos os Professores, investigadores e colegas do CICFANO que, de uma forma ou de outra, me acompanharam durante esta etapa, o meu muito obrigado.

Aos meus pais, um especial agradecimento por toda a dedicação e esforço que me permitiram alcançar os meus objetivos.

À minha restante família, namorado e amigos, agradeço o apoio e força incondicionais.

palavras-chave

Imagens de satélite, batimetria, agitação marítima, comprimento de onda

resumo

A determinação da batimetria em zonas costeiras a partir da técnica de detecção remota é uma abordagem atualmente explorada e vantajosa face às técnicas tradicionais. O presente estudo tem como objetivo desenvolver, testar e validar um método que, a partir de imagens de satélite SAR (*Synthetic Aperture Radar*) em que sejam bem visíveis as condições de ondulação da superfície do oceano, permita estimar a profundidade do fundo oceânico no setor Praia de Mira-Aveiro.

A aproximação das ondas a zonas pouco profundas resulta numa alteração do comprimento da onda. O método aplicado para estimar a batimetria tem como base a detecção da variação do comprimento de onda na imagem.

Aplicaram-se algoritmos elaborados em Matlab, para manipular as imagens de satélite, que forneceram informação acerca de vários parâmetros, essencialmente o comprimento de onda estimado em diversos pontos ao longo da área em estudo. A relação de dispersão da teoria linear das ondas está na base das equações usadas para determinar a profundidade em toda a região de interesse.

Efetuaram-se testes de sensibilidade a parâmetros preponderantes na determinação da batimetria, a fim de compreender que valores melhor se adequam ao estudo. Os resultados obtidos evidenciam uma concordância razoável entre os dados batimétricos calculados pelo método e os observados nas cartas náuticas do Instituto Hidrográfico para profundidades entre os 10m e os 30m.

keywords

Satellite imagery, bathymetry, maritime agitation, swell, wavelength

abstract

The bathymetry determination in coastal areas using remote sensing technique is a currently explored and advantageous approach compared to traditional techniques. This study aims to develop, test and validate a method that uses synthetic aperture radar (SAR) data in which is clearly visible the conditions of the ocean surface (*swell*) to estimate the ocean floor depth in the sector Mira Beach-Aveiro.

The approximation of the waves to shallow areas results in a change of the wavelength. The method for the bathymetry estimation is based on this assumption.

Algorithms developed in Matlab were applied to manipulate images to provide information about various parameters, mainly the wavelength estimated at several points along the studied area. The dispersion relation in linear wave theory is the basis of the equations used to determine the depth in the entire region of interest.

Sensitivity tests were performed on important parameters in the determination of the bathymetry, so that the values were better suited to the study. A reasonable agreement between the calculated data and the information observed by the Instituto Hidrográfico for depths between 10 and 30m is observed.

ÍNDICE

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Índice de Acrónimos e Abreviaturas	vii
Capítulo 1 Introdução	1
1.1. Motivação e objetivos.....	1
1.2. Estrutura do trabalho.....	3
Capítulo 2 Enquadramento	5
2.1. Revisão bibliográfica	5
2.1.1. Sensores de deteção remota	5
2.1.2. Aplicações a casos de estudo	7
2.2. Enquadramento e morfodinâmica do setor Praia de Mira-Aveiro	10
2.3. Fundamentos teóricos	11
2.3.1. Teoria linear das ondas.....	12
2.3.2. Dispersão das ondas.....	12
2.3.3. Empolamento.....	13
2.3.4. Refração	13
Capítulo 3 Metodologia	15
3.1 Base de dados.....	15
3.1.1. Parâmetros definidos na pesquisa de imagens.....	19
3.1.2. Exportação de imagens	20
3.1.3. Critérios de seleção de imagens.....	20
3.2. Processamento das imagens	21
Algoritmo <i>Getsubimagens.m</i>	21
Algoritmo <i>CalcWavelengthGrid.m</i>	22
Algoritmo <i>PixelToGroundCoords.m</i>	24
3.3. Determinação da batimetria.....	24
Capítulo 4 Resultados e discussão	27
4.1. Imagens analisadas	27
4.2. Testes de sensibilidade do algoritmo <i>CalcWavelengthGrid.m</i>	32
4.3. Cálculo do λ_o médio estimado pela imagem	37

4.4. Dados de Leixões e do SNIRH.....	39
4.5. Determinação da Batimetria	43
4.5.1. Testes de sensibilidade à dimensão da célula.....	45
4.5.2. Testes de sensibilidade ao valor do λ_0	51
4.5.3. Testes de repetibilidade do método.....	59
Capítulo 5 Considerações finais.....	67
5.1. Considerações futuras.....	70
Referências bibliográficas	71
<i>Sites consultados</i>	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Empolamento das ondas.	13
Figura 2 - Refração das ondas.....	13
Figura 3 - Mapa de Portugal apresentando a área em estudo.....	19
Figura 4 - Imagem 178a total	28
Figura 5 - Secção da imagem 178a invertida.....	28
Figura 6 - Subimagem 178a ao largo.....	28
Figura 7 - Secção da imagem 178a invertida	29
Figura 8 - Subimagem 178a (domínio junto à costa).....	29
Figura 9 - Imagem 07c8 total.....	30
Figura 10 - Subimagem 07c8 ao largo.....	30
Figura 11 - Subimagem 07c8 junto à costa	31
Figura 12 - Gráfico dos vetores de qualidade sobreposta à subimagem 2ece ao largo (invertida) em que $CellSize=4000$ metros e $GridSpacing=500$ metros	33
Figura 13 - Gráfico dos vetores de qualidade sobreposta à subimagem 2ece ao largo (invertida) com zoom aplicado.....	33
Figura 14 - Gráfico dos vetores de qualidade sobrepostos à subimagem 2ece junto à costa (invertida) em que $CellSize=2000m$ e $GridSpacing=500m$	35
Figura 15 - Gráfico dos vetores de qualidade sobrepostos à subimagem 2ece junto à costa (invertida) em que $CellSize=2500m$ e $GridSpacing=500m$	35
Figura 16 - Projeção da matriz de pontos de λ obtidos pelo método (a preto) sob a isolinha dos 200m observada pelo IH (a verde) para a subimagem 178a ao largo	38
Figura 17 - Projeção da matriz de pontos de λ obtidos pelo método (a preto) sob a isolinha dos 200m observada pelo IH (a verde) para a subimagem 07c8 ao largo.	38
Figura 18 - Localização dos pontos com profundidade calculada (h) para a imagem 178a ao largo	44
Figura 19 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a ao largo considerando 4km de lado da célula e λ_0 máximo de Leixões.....	45
Figura 20 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a ao largo com zoom, considerando 4km de lado da célula e o λ_0 máximo de Leixões	46
Figura 21 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 1km de lado e λ_0 máximo de Leixões.....	47
Figura 22 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 2km de lado e λ_0 máximo de Leixões.....	48

Figura 23 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa com zoom aplicado, considerando uma célula de 2km de lado e λ_0 máximo de Leixões	49
Figura 24 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa com zoom aplicado, considerando uma célula de 2km de lado e λ_0 máximo de Leixões	50
Figura 25 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 2km de lado e o λ_0 médio de Leixões.....	52
Figura 26 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 2km de lado e o λ_0 mínimo de Leixões.....	53
Figura 27 - Batimetrias calculada e observada para a imagem 07c8 junto à costa considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 máximo de Leixões.....	55
Figura 28 - Batimetrias calculada e observada para a imagem 07c8 junto à costa considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 médio de Leixões	56
Figura 29 - Batimetrias calculada e observada para a imagem 07c8 junto à costa considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 numa hora próxima à aquisição da imagem	57
Figura 30 - Gráficos do melhor ajuste batimétrico para cada imagem. (a) Subimagem 178a. (b) Subimagem 01d0. (c) Subimagem 2ece. (d) Subimagem 07c8. (e) Subimagem 19a7.....	59
Figura 31 - (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 10m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a)	61
Figura 32 - (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 15m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a)	62
Figura 33 - (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 20m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a)	63
Figura 34 - (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 25m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a)	64
Figura 35 - (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 30m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a)	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de processamento dos dados medidos pelos sensores de Landsat 8.....	16
Tabela 2 - Resolução dos modos de aquisição dos produtos SLC de nível-1	17
Tabela 3 - Produtos GRD de nível-1 FR	18
Tabela 4 - Produtos GRD de nível-1 HR	18
Tabela 5 - Produtos GRD de nível-1 MR.....	18
Tabela 6 - Coordenadas geográficas dos pontos dos polígonos delimitadores da área em estudo (datum WGS84).....	19
Tabela 7 - Valores de λ_0 médio estimado em cada imagem.....	37
Tabela 8 - Dados da boia de Leixões e do SNIRH para cada imagem.....	41
Tabela 9 - Classificação do vento	42

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AOP	<i>Apparent Optical Properties</i>
APRH	<i>Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos</i>
DR	<i>Deteção Remota</i>
DWD	<i>Deutscher Wetterdienst (German Weather Service)</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EW	<i>Extra-Wide swath</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FR	<i>Full Resolution</i>
GCP	<i>Ground Control Points</i>
GRD	<i>Ground Range Detected</i>
GSM	<i>Global Sea wave Model</i>
HR	<i>High Resolution</i>
IFSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
IH	<i>Instituto Hidrográfico</i>
IOP	<i>Inherent Optical Properties</i>
IW	<i>Interferometric Wide swath</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MR	<i>Medium Resolution</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ORI	<i>Orthorectified Radar Image</i>
QAA	<i>Multiband Quasi-Analytical Algorithm</i>
RGCI	<i>Revista da Gestão Costeira Integrada</i>
RISAT-1	<i>Radar Imaging Satellite</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SciHub	<i>Sentinels Scientific Data Hub</i>
SLC	<i>Single Look Complex</i>
SM	<i>Stripmap mode</i>
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
SNIRH	<i>Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos</i>
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
STEP	<i>Science Toolbox Exploitation Platform</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
WV	<i>Wave mode</i>

CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO

O estudo da hidrodinâmica das ondas gravíticas de curto período que se propagam de águas profundas para zonas costeiras fornece informação com variadas aplicações, como, por exemplo, para o apoio à navegação, à atividade piscatória e aos trabalhos de investigação em áreas como a oceanografia física, a geofísica, a biologia e a engenharia civil costeira.

As ondas são perturbações oscilatórias que se propagam na superfície livre da água do oceano e que transferem energia de um local do oceano para outro. As ondas são geradas através de trocas de energia entre a atmosfera e o oceano, sendo que a ação do vento tem um papel preponderante (Kinsman, 1965).

Em águas profundas, i.e., em oceano aberto, as ondas propagam-se com uma determinada amplitude, comprimento de onda (λ), direção e velocidade, sem que exista influência do fundo oceânico. A aproximação a regiões de menor profundidade traduz-se na alteração das características da onda. As mudanças no comportamento da onda com a aproximação à zona costeira relacionam-se intimamente com a batimetria, uma vez que existe uma forte correlação entre alterações do λ e a estrutura de fundo (Mishra *et al.*, 2014).

A determinação da batimetria na zona costeira é importante para estudos relacionados com a dinâmica costeira. A profundidade do fundo marinho pode ser estimada a partir de diversas plataformas, nomeadamente, navios, submersíveis, aeronaves e satélites. Existem métodos que se baseiam em deteção remota (satélites), sendo esta uma temática relativamente recente e atualmente em exploração.

1.1. Motivação e objetivos

O levantamento batimétrico de uma determinada área do oceano, de lagos, lagoas e rios consiste na medição das profundidades. Os dados batimétricos ilustram o perfil submarino e as variações do relevo do fundo e podem ser representadas por diferentes linhas de contorno denominadas isóbatas.

Os estudos batimétricos têm aplicação em diversas áreas como a oceanografia física, a geologia marinha, a geofísica, a biologia e os recursos marinhos (Hell *et al.*, 2012). É disso exemplo a elaboração de cartas náuticas que se baseiam em informação obtida em explorações batimétricas e que são guias essenciais para a navegação marítima; os mapas batimétricos auxiliam, também, no conhecimento dos efeitos das alterações climáticas no meio ambiente, i.e., a subida do nível médio das águas do mar e a subsidência de terreno; a batimetria de alta resolução facultar, ainda, informação acerca dos ecossistemas marinhos a partir das características do fundo marinho que definem os habitats de organismos bentónicos (*National Oceanic and Atmospheric*

Administration – NOAA). A monitorização da batimetria da zona costeira tem especial relevância tendo em conta a dinâmica do fundo e a importância que o conhecimento da mesma representa para a navegação, como no caso das zonas portuárias, e para a erosão costeira (recuo da linha de costa).

Tradicionalmente, a profundidade do fundo oceânico é mapeada a partir de métodos acústicos que se baseiam no tempo percorrido por um pulso sonar acústico. Este método consiste no disparo de um sinal acústico a bordo de um navio que atravessa a coluna de água até chegar ao fundo e regressa, sendo possível medir a profundidade a partir da velocidade do som na água, das características do sensor e o tempo de propagação do sinal, entre outros parâmetros. A principal vantagem deste método tradicional é a precisão da informação, no entanto, pode ser dispendioso, inacessível em áreas remotas, ou em zonas de águas pouco profundas, e condicionado pelas condições climáticas (Jawak *et al.*, 2015).

Os métodos baseados em deteção remota (DR) podem superar algumas das desvantagens do método tradicional. Em zonas costeiras de águas pouco profundas, estes métodos podem ser mais eficientes e menos dispendiosos, aplicam-se em diversos tipos de ambiente e fornecem informação batimétrica a escalas espaciais que o primeiro método tem mais dificuldade em resolver. A DR inclui um conjunto de técnicas que medem a energia emitida pela superfície terrestre, através de sensores a bordo de plataformas aéreas (por exemplo, o avião) ou espaciais (os satélites), sendo efetuada uma aquisição de dados de forma *a posteriori*, ser criada uma imagem da superfície do solo e/ ou oceânica (Richards & Jia, 1999). As tecnologias mais utilizadas para derivação da batimetria por DR podem ser divididas em dois grupos: métodos passivos e ativos. O primeiro baseia-se no facto de os objetos da superfície terrestre refletirem radiação eletromagnética proveniente do Sol. As técnicas fotogramétricas e os sensores de deteção remota óticos incluem-se nesse grupo. O segundo baseia-se na emissão de radiação por fonte própria do método de DR. Neste grupo, estão incluídos os sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging* – Luz de Deteção e Alcance) e SAR (*Synthetic Aperture Radar* – Radar de Abertura Sintética) (Jawak *et al.*, 2015). O método de deteção remota ótico baseia-se na quantidade total de energia radiativa refletida pela coluna de água e tem em conta a radiação de curto comprimento de onda no espectro azul e verde, tendo, portanto, uma maior capacidade de penetração (Gao, 2009). A tecnologia LIDAR emite radiação na zona do infravermelho (IV) (que é refletida predominantemente pela superfície da coluna de água) e do verde ou azul do espectro (que penetra a coluna de água) e recebe, de volta, o sinal da superfície; é aplicável em diversos ambientes de difícil alcance e é afetada pelo estado da superfície e pela turbidez da água (Jawak *et al.*, 2015). A tecnologia SAR deduz informação batimétrica a partir de alterações na superfície oceânica, baseando-se na rugosidade e na altura desta (Jawak *et al.*, 2015). Funciona particularmente em zonas muito dinâmicas, onde a batimetria sofre frequentes modificações. Apesar de uma precisão relativamente reduzida, no que respeita à cobertura global, adequa-se a zonas costeiras e a oceanos por permitir detetar condições de *swell*, derrames de petróleo, ventos e

correntes à superfície, nível do mar, entre outros, sendo imune a condições meteorológicas (Lira & Taborda, 2014).

Neste contexto, e considerando os vários métodos de DR, verifica-se que os métodos passivos são mais adequados a regiões de águas pouco turvas e com regimes de agitação pouco energéticos. Por outro lado, os métodos ativos como o LIDAR e, particularmente, o SAR são mais adequados a regiões com elevados regimes de agitação marítima, uma vez que nesses regimes o *swell* pode ser usado para derivar a morfologia do fundo.

O setor costeiro localizado entre a Praia de Mira e Aveiro inserido na costa noroeste portuguesa é caracterizado por ser uma região altamente energética inferida pelo forte regime de ondas provenientes de noroeste (Coelho *et al.*, 2009). O fundo arenoso do setor em estudo é alvo da agitação marítima característica e sofre alterações suscetíveis de serem investigadas e analisadas, ao contrário de um fundo rochoso que se mantém constante. Os levantamentos batimétricos deste setor são escassos (Ferreira, 1993; Rey & Bernardes, 2004) e de difícil obtenção, nomeadamente na zona que apresenta maior dinamismo (por exemplo, as barras litorais). As características da região em questão enquadram-se, por conseguinte, no método válido para costas com muita ondulação e agitação marítima, a tecnologia SAR.

A presente dissertação tem como objetivo principal estimar a batimetria no setor Praia de Mira-Aveiro, através da análise e processamento de imagens SAR, e avaliar a possibilidade de utilização deste método para esse fim.

1.2. Estrutura do trabalho

Esta dissertação apresenta no Capítulo 1 uma breve introdução ao tema em estudo, incluindo os objetivos e a motivação e a estrutura do trabalho. A revisão bibliográfica e os fundamentos teóricos são apresentados no Capítulo 2.

O Capítulo 3 descreve a metodologia abordada, sendo explicadas as etapas que levaram à elaboração da base de dados (a pesquisa de imagens, os parâmetros definidos nessa pesquisa, a exportação e os critérios de seleção dessas mesmas imagens), o processamento das imagens através dos algoritmos desenvolvidos em Matlab e as equações para a determinação da batimetria.

No Capítulo 4, expõem-se os resultados obtidos e a discussão. Primeiramente, apresentam-se algumas imagens e suas subimagens que englobam dois domínios: ao largo e junto à costa. Numa segunda parte, descrevem-se os testes de sensibilidade do algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*, uma vez que este requer argumentos de entrada preponderantes. Estes testes pretendem compreender o efeito destas variáveis nos resultados obtidos. A terceira parte explicita o cálculo dos comprimentos de onda

médios em águas profundas (λ_0) estimados diretamente em cada imagem. A quarta parte apresenta a descrição e a análise de dados de agitação marítima (medidos pela boia ondógrafo de Leixões) e a informação da velocidade do vento (disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – SNIRH) para o dia de cada imagem. A quinta parte, apresenta os gráficos que ilustram os dados batimétricos obtidos pelo método, sobrepostos à batimetria observada pelo Instituto Hidrográfico, sendo, também, efetuada a sua análise e discussão.

No Capítulo 5, apresentam-se as considerações finais mais relevantes, decorrentes da análise efetuada ao longo deste estudo.

CAPÍTULO 2 | ENQUADRAMENTO

2.1. Revisão bibliográfica

2.1.1. Sensores de detecção remota

A aplicação de DR para a determinação da profundidade do fundo marinho inclui um conjunto de técnicas em investigação que têm vindo a demonstrar ser bastante eficazes no estudo da dinâmica das áreas costeiras (Lira & Taborda, 2014). A possibilidade de desenvolver modelos batimétricos a partir de imagens via satélite é atualmente um método promissor (Kearns & Breman, 2010). Os métodos de aquisição de dados batimétricos sem recurso à técnica de DR fornecem perfis de profundidade precisos ao longo de setores, no entanto, (como anteriormente referido na secção 1.1. do primeiro capítulo) são dispendiosos e ineficazes em áreas de difícil acesso e perante condições ambientais adversas em águas pouco profundas, ou seja, junto à costa (Jawak *et al.*, 2015).

Segundo Gao (2009), as técnicas que se baseiam em DR para estimar a batimetria, diferem, sobretudo, pela capacidade de detecção em profundidade, pela sensibilidade a determinados fatores (transparência da água, refletância de fundo e materiais presentes no fundo), pelo tipo de ambiente a que melhor se adequam (estuários, lagos, zonas pouco profundas ou oceano aberto), pela precisão, pela exatidão e pelo erro. Os dois principais métodos que se enquadram nestas técnicas são os de DR ativos e passivos (Jawak *et al.*, 2015), referidos anteriormente na secção 1.1., do primeiro capítulo.

Os métodos de derivação da batimetria podem, ainda, ser categorizados como *non-imaging* e *imaging* (Gao, 2009). O método *non-imaging* produz informação batimétrica exata até aos 70 metros de profundidade, em águas límpidas, tendo como desvantagens os elevados custos e um intervalo de amostra batimétrica grosseiro. O sensor LIDAR é um dos principais métodos *non-imaging* (Jawak *et al.*, 2015). No que diz respeito ao método *imaging*, este baseia-se no valor de píxeis ou nos números digitais de uma imagem para efetuar uma aproximação da profundidade do fundo e usa a radiação na banda do visível e/ou próxima do infravermelho (IV) e a radiação micro-ondas. Nesta categoria, considera-se pertinente salientar o uso do sensor ótico, que pode ser implementado de uma forma analítica, de uma forma empírica, ou combinando ambas, e do sensor SAR/micro-ondas (Jawak *et al.*, 2015).

Apresentadas as categorizações usadas em DR para a derivação de informação batimétrica segundo diferentes autores, explicitam-se as metodologias de DR, consideradas de maior relevância, segundo (Jawak *et al.*, 2015), com recurso aos sensores ótico, LIDAR e SAR.

A metodologia de medições batimétricas a partir da DR ótica, sendo um sensor do tipo passivo e considerado um método *imaging*, parte do princípio de que a quantidade de

energia radiativa refletida pela coluna de água está relacionada com a profundidade. Por outras palavras, a radiação solar incidente propaga-se ao longo da coluna de água, sendo retrodifundida e absorvida pelas moléculas da água e pelos seus constituintes. Esta energia é emitida e detetada por DR *imagery*, sendo, posteriormente, sujeita a correções atmosféricas e à remoção dos efeitos da coluna de água. Sabendo que a energia recebida pelo sensor ótico é inversamente proporcional à profundidade, poderá aplicar-se o princípio da derivação batimétrica através de um modelo analítico ou de um modelo empírico (Jawak *et al.*, 2015). O modo analítico ou semi-analítico torna-se complexo e difícil de aplicar, uma vez que se baseia na transmissão de luz na água e requer a consideração de parâmetros *in situ* relacionados com as propriedades da atmosfera, da coluna de água e do material do fundo marinho (Gao, 2009). Este modelo aplica-se a rios, estuários e águas interiores túrbidas e pouco profundas e é bastante exato. Quanto ao modo empírico, a relação entre a radiância de um corpo de água detetada por DR e a profundidade de um dado local é estabelecida empiricamente sem ser necessária informação acerca da forma como a luz é transmitida na água (Gao, 2009). O modo empírico é um modelo que se baseia na regressão linear ou não linear entre a batimetria e as propriedades da imagem, considerando, apenas, determinadas condições do meio em estudo. Este modo é mais simples e fácil de aplicar pelo limitado número de parâmetros que tem em conta. O modo empírico tem uma exatidão variável; aplica-se em zonas costeiras e águas em oceano aberto; depende de fatores como a turbidez da água e a refletância de fundo; tem as vantagens de ser exato a uma dada profundidade e simples de executar; as desvantagens são o facto de ser pouco exato para profundidades mais elevadas e de serem necessários dados do fundo em tempo real (Gao, 2009). Ambos os modos possuem a capacidade de detetar profundidades até aos 20 metros e exigem medições de profundidade em simultâneo, mas têm a vantagem de produzir mapas batimétricos bem detalhados em zonas costeiras túrbidas extensas e em lagos interiores (Gao, 2009).

O sensor LIDAR é do tipo ativo e um método *non-imaging*. Este sistema transmite luz laser composta por dois feixes, um verde cujo comprimento de onda é de 532 nm e um infravermelho (IV) de 1064 nm (Mallet & Bretar, 2009). O feixe IV é refletido pela camada superficial da água de volta para o sensor, o que permite saber a distância entre este e a superfície oceânica. O feixe verde atravessa a *interface* ar-água e propaga-se ao longo da coluna de água até ao fundo marinho. A série temporal é composta por dois picos (Mallet & Bretar, 2009). A profundidade é estimada a partir do tempo da trajetória percorrida pelo sinal entre a superfície da água e o fundo marinho (Splinter & Holman, 2009), i.e., considera-se a deslocação efetuada, denominada “two-way travel” (uma vez que ocorre a emissão – primeiro caminho – e o posterior regresso do sinal – segundo caminho) (Gao, 2009). Identificam-se os pulsos refletidos da superfície aquática e do fundo oceânico, calcula-se a diferença temporal entre ambos e, assim, estima-se a profundidade aplicando cálculos matemáticos simples que incorporam as características da coluna de água e parâmetros ambientais e do meio envolvente (Jawak *et al.*, 2015). Estes sistemas LIDAR usam pulsos de curto comprimento de onda (cor verde), a fim de maximizar o poder de penetração na água, uma vez que a absorção

da radiação de longo comprimento de onda aumenta significativamente neste meio e, no caso de comprimentos de onda mais curtos, a sua retrodifusão e absorção por substâncias presentes na água também aumenta rapidamente (Wang & Philpot, 2007). O sensor LIDAR tem uma precisão bastante elevada de aproximadamente 15 centímetros; os fatores influenciadores são a transparência da água, o material que constitui o fundo marinho e a forma da superfície livre da água; aplica-se a uma variedade de ambientes aquáticos de pouca profundidade; tem como vantagens a capacidade de medir profundidades desde os 1,5m até aos 60m (dependendo da turbidez da superfície da água) (Wang & Philpot, 2007) e não requerer medições simultâneas; as desvantagens consistem numa largura de banda limitada e nos custos dispendiosos (Jawak *et al.*, 2015).

O sensor SAR/micro-ondas, vocacionado para determinação da batimetria, é um método *imaging* e do tipo ativo. Esta plataforma permite detetar variações do fundo marinho, contudo não é capaz de determinar o nível de água absoluto ou inclinações muito suaves (Calkoen *et al.*, 2001). Nas imagens SAR, é possível identificar efeitos na superfície oceânica induzidos por variações nas correntes relacionadas com a topografia de fundo. A tecnologia SAR resume-se a três etapas: (i) a interação entre o fluxo das correntes e a topografia de fundo que resulta em modulações na velocidade do fluxo à superfície; (ii) a interação entre este fluxo superficial variável e as ondas superficiais de curto comprimento de onda; (iii) a interação entre estas ondas e os sinais de radar (Huang *et al.*, 2001). O sensor SAR permite observar diversos fenómenos oceânicos (possíveis de identificar à superfície como por exemplo o empolamento e a refração das ondas) cujas “assinaturas” características são visíveis na rugosidade da superfície oceânica (Robinson, 2004). Um pulso micro-ondas é gerado e emitido, sendo retrodifundido pela superfície do oceano e recebido, novamente, pela antena radar. Neste processo, os pulsos transmitidos produzem ecos que são recebidos nos intervalos entre os pulsos e armazenados num sinal analógico. O sistema SAR aplica-se para a obtenção da batimetria em águas costeiras. Esta tecnologia tem uma precisão relativamente baixa (o que constitui um ponto negativo). Os fatores limitadores são a resolução de imagem, a identificação de ondas e frentes de ondas, a existência de derrames de óleos e determinadas condições climáticas como o vento. Os aspetos positivos são a possibilidade de cobrir grandes áreas e a insensibilidade à cobertura de nuvens. De notar, ainda, que este radar é capaz de capturar variações da rugosidade das superfícies oceânicas (Gao, 2009).

2.1.2. Aplicações a casos de estudo

Lafon *et al.* (2012) apresenta e compara duas abordagens complementares, para zonas profundas e para áreas de baixa profundidade, que permitem efetuar mapeamentos batimétricos com recurso a imagens óticas de alta resolução, uma vez que considera a DR uma alternativa eficaz. As duas áreas em estudo situam-se na costa Aquitaine, em França, sendo estas a entrada/barra da laguna de Arcachon, uma zona de baixas

profundidades que variam entre os 0 e os 6 metros, e a zona ao largo da entrada da laguna cuja profundidade varia entre os 5 e os 40 metros. Para a zona de baixa profundidade, foi considerada a refletância da água e consideraram-se duas metodologias: a calibração empírica, que se baseia em dados da zona em estudo adquiridos via satélite de forma a obter um mapeamento batimétrico completo, e o modelo semi-analítico, que requer medições óticas para converter a refletância em profundidade. Para a zona da barra, foi efetuada uma calibração empírica dos dados através da aplicação de um algoritmo de forma a obter um mapeamento batimétrico completo. A raiz do erro médio quadrático da profundidade determinada por este método é de 50 centímetros e a sua precisão é condicionada pela turbidez da água, por alterações da composição do material de fundo (que ocorrem naturalmente nestas zonas menos profundas) e pela cobertura espacial das imagens de satélite disponíveis. O método semi-analítico, com menos limitações que a abordagem anterior, foi aplicado a imagens SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) e requer a aquisição de medições óticas. Esta abordagem consiste num algoritmo adaptado do modelo QAA de Lee *et al.* (2002), sendo este um algoritmo semi-analítico que se baseia em multi-bandas e que retribui os coeficientes de absorção e retrodifusão a partir da refletância de imagens óticas de DR de águas profundas. O modelo semi-analítico implementado por Lafon *et al.* (2012) deriva propriedades óticas inerentes (*Inherent Optical Properties* – IOPs – que inclui os coeficientes de absorção e retrodifusão (Lee, 2002)) dos constituintes da água a partir de imagens de DR (imagens HR – *Hyperspectral* – que detetam radiação espectral em várias dezenas de bandas (Jawak *et al.*, 2015)), sendo consideradas relações analíticas e empíricas entre IOPs e propriedades óticas aparentes (*Apparent Optical Properties* - AOP) que prescindem de dados reais de fundo. A precisão dos mapas batimétricos gerados a partir desta metodologia varia entre os 40 centímetros e 1 metro, aproximadamente.

Lafon *et al.* (2012) conclui que, em regiões mais profundas (5 a 40 metros), os algoritmos que se baseiam na refletância não são aplicáveis e efetua-se a inversão da relação de dispersão linear das ondas, a partir de DR ótica ou de imagens (SAR), para estimar a batimetria junto à costa. Aplicou-se uma abordagem que compreende três etapas: (i) identificação da crista da onda, (ii) deteção do comprimento de onda (que engloba o uso da transformada Fourier em 2D e o número de onda associado à energia máxima da onda) (iii) e a aplicação da relação de dispersão das ondas.

O autor conclui, ainda, que em zonas pouco profundas, o método empírico é eficiente em termos de tempo, mas requer dados adquiridos via satélite que permitam fornecer resultados precisos independentemente das variações de turbidez da água. As desvantagens desta abordagem são o facto de ser dispendiosa e ser, apenas, aplicável em regiões costeiras que estejam sob cobertura de satélites. O método semi-analítico pode ser implementado em qualquer região e não necessita de dados reais de fundo. As novas formulações efetuadas no modelo QAA de modo a ajustar-se aos requisitos dos sistemas HR demonstraram que o algoritmo é fiável, mas tem uma precisão insuficiente. Em água profundas, a inversão das propriedades da onda nas imagens óticas revela um grande potencial, apesar de ser necessário um trabalho futuro.

Mishra *et al.* (2014) estuda o fenómeno de refração na ondulação (*swell*) em imagens de satélite RISAT-1 (*Radar Imaging Satellite* desenvolvido pela Organização de Investigação Espacial Indiana) SAR de banda-C numa região costeira de Mumbai, na Índia, com o objetivo de estimar a batimetria naquela zona. Esta abordagem serve de base para o tema em estudo da presente dissertação. Considerando que, em zonas junto à costa, a estrutura do fundo marinho se altera rapidamente, originando mudanças nas características das ondas, é possível relacionar o comprimento de onda, que diminui com a aproximação de profundidades reduzidas, com a batimetria (assunto referido anteriormente no Capítulo 1 e explorado posteriormente ao longo deste trabalho). O sensor SAR fornece informação a duas dimensões da superfície oceânica, e a sua alta resolução espacial das imagens adquiridas permite capturar alterações na direção da onda e no comprimento de onda. A metodologia do estudo efetuado por Mishra *et al.* (2014) foca-se, sobretudo, nos fenómenos de empolamento e de refração das ondas e engloba duas etapas: (i) o método de deteção de ondas nas imagens SAR e (ii) a relação de dispersão linear das ondas. A primeira fase aplica a técnica de FFT – *Fast Fourier Transform* – que decompõe o sinal no domínio do espaço em componentes e permite obter uma periodicidade regular das imagens. A FFT (aplicada de acordo com os critérios definidos por Mishra *et al.*, 2014) é executada numa subimagem SAR que constitui uma pequena célula quadrada (caixa) e devolve um espectro, cujo pico representa o comprimento de onda e a direção das ondas superficiais médios, a partir de expressões que consideram parâmetros como a resolução espacial (15m) e o tamanho da subimagem (128×128 píxeis). A caixa desloca-se (com um espaçamento de 5 píxeis que equivalem a 75m) desde o oceano aberto até à região costeira, perpendicularmente à linha de costa. A segunda fase consiste em estimar a profundidade do fundo oceânico (para cada célula FFT) através da relação de dispersão linear dada por

$$D(L, w) = \frac{L}{2\pi} \operatorname{arctanh} \left(\frac{w^2 L}{2\pi g} \right) \quad (1)$$

Onde L é o período de pico, w é a frequência de pico (dada por $w = 2\pi/t$ em que t é o período de pico, sendo considerado 13s) e g a aceleração da gravidade. O autor verificou que o comprimento de onda e a profundidade estimados pela FFT ao longo de uma faixa confirmaram que estes parâmetros diminuem ao aproximarem-se da costa, o que seria expectável pelas leis da física aplicadas à área em estudo. O λ variou entre os 80 e 210m. A cerca de 17km da linha de costa a profundidade estimada foi de 35m e imediatamente antes da zona de rebentação a profundidade foi de 5m. A batimetria estimada pelo método de Mishra *et al.* (2014) é concordante com os mapas batimétricos globais disponíveis para a zona em estudo, apesar de a resolução do método ser superior à dos mapas, o que impossibilita uma validação estatística, sendo necessárias medições *in situ* obtidas a partir de outros recursos, como os sonares.

A derivação da batimetria, em áreas costeiras, a partir da análise dos fenómenos de refração e empolamento das ondas em imagens de satélite é, também, investigada por Brusch *et al.* (2011). O autor analisa imagens do satélite TerraSAR-X, de alta resolução, que abrangem duas zonas: a entrada do porto *Phillip*, perto de Melbourne, na Austrália, e o *Duck Research Pier*, na Carolina do Norte, nos Estados Unidos da América. Este satélite descreve uma órbita heliossincrónica, que significa que passa num dado local todos os dias à mesma hora, possui um ciclo de 11 dias, sendo capaz de adquirir imagens da mesma região segundo diferentes ângulos de incidência. O método apresentado por Brusch *et al.* (2011) usa a técnica FFT e a relação de dispersão linear, analogamente a Mishra *et al.* (2014). Além disso, são analisados padrões produzidos pela rebentação das ondas a fim de estimar a altura das ondas no momento em que rebentam, a partir da medição do comprimento das “linhas” de rebentação visíveis nas imagens SAR. Nestes produtos foram, ainda, observáveis fenómenos de difração no porto *Phillip* e de refração, pelo encurtamento do λ , em águas pouco profundas, e a tendência de as cristas das ondas se tornarem paralelas à costa. Na aplicação da equação de dispersão linear, o autor considerou que a frequência angular é dada por $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência da onda dada por $f = 1/T$, onde T é o período da onda. A frequência da onda é calculada pela combinação entre o primeiro comprimento de onda medido e a primeira estimativa da profundidade de um conjunto de dados topográficos. Primeiramente, o período da onda é obtido para diferentes profundidades usadas na equação de dispersão linear e, em seguida, é aplicado para obter a topografia de fundo para diversos λ . Uma vez obtidas as profundidades para cada λ estimado, os dados são interpolados de forma a obter um mapa batimétrico. A fim de comparar os λ obtidos pela FFT, usou-se o modelo de ondas oceânicas global (GSM) do Serviço Meteorológico Alemão (DWD). Verificou-se um desvio de, aproximadamente, 20m entre os λ medidos e os λ do DWD, provavelmente pela baixa resolução deste modelo. Concluiu-se que as variações de profundidade são bem reproduzidas por existir uma concordância entre a batimetria estimada por Brusch *et al.* (2011) e a informação batimétrica de mapas náuticos, em ambos os casos de estudo.

2.2. Enquadramento e morfodinâmica do setor Praia de Mira-Aveiro

A área em estudo localiza-se na região litoral centro da costa oeste portuguesa e engloba um troço que se estende desde a embocadura da laguna de Aveiro até à Praia de Mira, mais concretamente até à zona imediatamente a norte da Barrinha de Mira.

O sistema litoral em questão é arenoso. A extensão da plataforma continental, na componente transversal, entre Aveiro e Praia de Mira é de 45 km, aproximadamente. Nesta região, a plataforma é dominada por uma aplanção que se prolonga até ao bordo

e possui uma cobertura de sedimentos não consolidados, recente e quase sempre presente (Ferreira, 1993). Este tipo de fundo marinho torna-o suscetível de alterações provocadas pelos forçadores oceanográficos da região.

Segundo Ferreira (1993), ocorrem diversos acidentes morfológicos ao longo de um perfil perpendicular à linha de costa. Existe uma pequena barra imersa arenosa longitudinal (denominada barra interna) muito próxima da praia emersa, a cerca de 300m de distância, com 0,5 a 1m de altura e 80m a 120m de largura, aproximadamente. Verifica-se a existência de uma barra submarina externa (a 300m da primeira barra), alongada, de dimensões variáveis, subparalela à costa e que constitui uma importante acumulação de sedimentos. Em direção ao largo, forma-se o prisma continental que consiste num corpo arenoso de grandes dimensões, subparalelo à linha de costa e contínuo ao longo de 50 km. A parte interna deste prisma desenvolve-se entre os -10m de profundidade, aproximadamente, (sendo o fim da barra externa) e a parte externa estende-se até aos cerca de -40m. A partir deste limite, o fundo oceânico apresenta um perfil mais aplanado de declive mais suave. Durante a ocorrência de temporais (regime de inverno), i.e., quando a agitação marítima é elevada e consequentemente a intensidade das correntes e o fluxo sedimentar são mais fortes para o largo, a barra externa tende a deslocar-se para esta zona e sofre modificações abruptas. No regime de verão, quando a agitação marítima é menos energética, a barra externa modifica-se de uma forma mais gradual e ocorre um transporte de sedimentos ao longo do perfil para a praia, tornando o fundo mais suave.

A noção de profundidade de fecho permite estabelecer o limite ao largo do perfil ativo da praia submersa. Este conceito define a profundidade a partir da qual o perfil de praia não sofre modificações significativas, ou seja, é o limite inferior de uma zona onde ocorre um intenso transporte sedimentar entre a praia emersa e a submersa, onde o perfil sofre modificações sazonais ou provocadas por temporais (APRH, sem data). Ferreira (2013) estimou estes limites, sendo que para a zona em estudo a profundidade média entre Costa Nova do Prado e Barra de Mira é -14,5 metros.

2.3. Fundamentos teóricos

As ondas oceânicas são geradas pelo vento que exerce tensão sobre a superfície livre do oceano, sendo geradas ondas com uma amplitude, A , e comprimento de onda, λ , reduzidos. A contínua ação do vento desenvolve estas ondas, cuja amplitude, comprimento de onda e velocidade de propagação vão aumentando progressivamente, havendo uma maior transferência de energia entre os dois meios (atmosfera e oceano). Em águas profundas, a velocidade de propagação das ondas mantém-se relativamente

constante e é determinada pelo período/comprimento de onda. Quando as ondas se aproximam de zonas pouco profundas, ocorre uma alteração das características da estrutura da onda: a velocidade de propagação diminui, verifica-se uma diminuição do comprimento de onda, ou seja, a distância entre as cristas encurta, e a amplitude aumenta. A redução da profundidade conduz ao fenómeno de refração das ondas. As características da onda adaptam-se à morfologia de fundo, existindo, portanto, uma relação entre a batimetria e o comportamento da onda, referido anteriormente no Capítulo 1. Para uma melhor compreensão e explicitação dos fundamentos teóricos relevantes para o presente estudo, consultou-se o glossário *online* da Revista de Gestão Costeira Integrada (RGCI).

2.3.1. Teoria linear das ondas

A teoria linear das ondas, também denominada teoria de Airy, baseia-se em expressões matemáticas que descrevem e relacionam a forma da onda, o comportamento desta ao longo da coluna de água (ou fluido), a pressão das ondas, e as suas alterações aquando do fenómeno de empolamento. Esta teoria assume que as ondas possuem uma reduzida amplitude (A), de tal forma que a razão entre A e o λ é muito menor do que 1; que apenas transferem energia e não a matéria; que a propagação da onda ocorre sem a sua distorção; que a velocidade de propagação é constante, sendo uma onda conservativa. As equações de Airy diferem de águas profundas para pouco profundas uma vez que com a diminuição da profundidade, a dinâmica das ondas altera-se e estas são não-dispersivas.

2.3.2. Dispersão das ondas

As ondas afastam-se progressivamente da zona de geração e propagam-se a uma velocidade superior à do vento. A razão entre a altura da onda e o comprimento de onda (declividade da onda) diminui e as características das ondas tornam-se mais uniformes, constituindo-se, assim, a ondulação (*swell*). Nesta fase, ocorre a dispersão das ondas, i.e., as que têm um maior comprimento de onda (λ) propagam-se mais rapidamente do que as que possuem um menor λ . A velocidade de onda é a razão a que a fase de onda se propaga no espaço e, para águas profundas, é dada por $c = \sqrt{g\lambda/2\pi}$ em que c é a celeridade e g a aceleração da gravidade, sendo que a velocidade é proporcional a λ . A relação de dispersão das ondas é dada por

$$\sigma^2 = gk \times \tanh(kh)$$

onde g é a aceleração da gravidade, k é o número de onda e h é a profundidade. Na metodologia (descrita no Capítulo 3), é apresentada a equação de dispersão e os ajustes efetuados a fim de obter a equação que permite estimar a profundidade de fundo.

2.3.3. Empolamento

O empolamento da onda ocorre aquando da aproximação de águas pouco profundas. A diminuição da profundidade provoca um encurtamento de λ e uma redução da velocidade da onda. Consequentemente, e tendo em conta que o fluxo de energia transportado pelas ondas é constante, a amplitude das ondas aumenta de forma a que a energia da onda por unidade de área aumente.

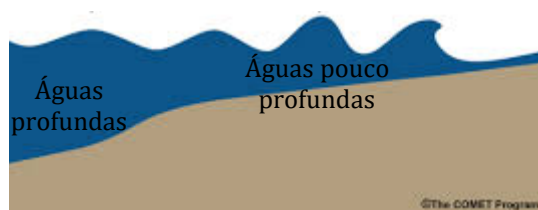


Figura 1 - Empolamento das ondas.
Fonte: adaptado de *Programa COMET*

2.3.4. Refração

O fenómeno de refração resultante da diminuição da profundidade envolve alterações das propriedades da onda com tendência a que a direção de propagação oblíqua à topografia de fundo se torne consecutivamente mais paralela a esta. A velocidade de propagação diminui com a aproximação ao litoral. Ocorre o encurvamento da crista da onda devido à variação da profundidade: a base da onda (mais próxima do fundo) propaga-se mais lentamente do que a crista da onda (mais afastada do fundo) e, por conseguinte, esta diferença de propagação ao longo da estrutura da onda faz com que a crista tenda a encurvar.

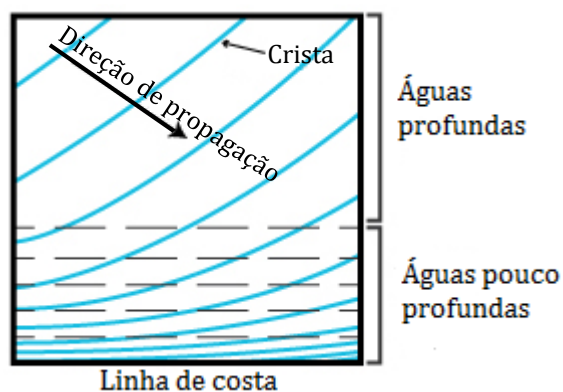


Figura 2 – Refração das ondas.
Fonte: adaptado de *Pacific Tsunami Museum*

CAPÍTULO 3 | METODOLOGIA

O presente capítulo começa por descrever as etapas que levaram à elaboração da base de dados de imagens a analisar. Esta descrição inclui as características de algumas plataformas e sensores pertinentes para o estudo, os parâmetros estabelecidos aquando da pesquisa das imagens de satélite e considerações no seu *download* e os critérios usados na catalogação destas imagens. Em seguida, faz-se uma breve descrição do funcionamento dos algoritmos elaborados em Matlab usados no processamento e manipulação das imagens. Por fim, apresentam-se as funções que permitiram determinar a batimetria de fundo.

3.1 Base de dados

Numa primeira fase, procedeu-se à recolha de imagens de satélite em que fosse bem visível a ondulação para a zona de estudo. Acedeu-se ao *site Earth Explorer*¹, da *United States Geological Survey* (USGS), e ao *site Sentinels Scientific Data Hub*² inserido no sistema europeu de monitorização da Terra, o *Copernicus*, uma iniciativa e parceria entre a Comissão Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA). Em cada site foi efetuada uma pesquisa de imagens, sendo solicitadas os resultados relativos às plataformas disponíveis para o intervalo de tempo de interesse.

Site Earth Explorer

O *site Earth Explorer* disponibiliza produtos reunidos em diversas missões. Após delimitar a zona de estudo e definir o intervalo de tempo desejado, solicitaram-se os resultados das seguintes plataformas:

- *Landsat 4 and 5 Thematic Mapper* (1982 – 2012);
- *Landsat 4 and 5 Surface Reflectance Product* (1982 – 2012);
- *Landsat 7 Surface Reflectance Product* (1999 – presente);
- *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Scan Line Corrector (SLC) On* (1999 – 2003): os dados recolhidos neste período correspondem a imagens anteriores a uma falha do instrumento SLC;
- *Landsat 7 ETM+ SLC off* (2003 – presente): trata-se de um sensor a bordo do satélite Landsat 7; as imagens são compostas por 8 bandas espectrais com resolução espacial de 30 metros, excetuando a banda pancromática 8 que tem uma resolução de 15 metros; ocorreu uma falha neste instrumento em maio de 2013 que originou uma perda parcial dos dados apesar da contínua aquisição de imagens;

¹ <http://earthexplorer.usgs.gov/>

² <https://scihub.copernicus.eu/>

- *Light Detection and Ranging (LIDAR)* (2000 – presente): esta tecnologia recolhe nuvens de pontos a três dimensões da superfície terrestre;
- *Interferometric Synthetic Aperture Radar (IFSAR) Orthorectified Radar Image (ORI) Alaska* (2010 – 2012): a eficácia do IFSAR deve-se ao facto de adquirir dados em condições climatéricas adversas extremas;
- *L8 OLI/TIRS Pre-WRS-2* (2013): os dados provenientes destes instrumentos correspondem a cerca de 10000 imagens desde o lançamento do satélite Landsat 8 até este estabelecer a órbita operacional, entre fevereiro e abril de 2013;
- *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)* (2013 – presente): trata-se de instrumentos a bordo da missão Landsat 8, sucessora do Landsat 7, que tem como objetivo fornecer continuamente imagens na região do visível e do infravermelho (IV) da superfície terrestre e das zonas costeiras, num ciclo repetitivo de 16 dias; o dispositivo OLI é uma evolução dos sensores anteriores, tendo duas novas bandas (um canal no azul escuro do visível para a investigação de zonas costeiras e recursos marinhos e um novo canal na região do infravermelho para a deteção de nuvens altas, os *cirrus*); o sensor TIRS consiste em duas novas bandas térmicas no IV;
- *European Space Agency Sentinel-2* (2015 – presente): a missão *Sentinel-2* baseia-se numa constelação de dois satélites desenvolvidos com a finalidade de auxiliar na monitorização de cobertura terrestre, da vegetação e ambiental.

Após ter solicitado os resultados dos sensores referidos anteriormente, todas as imagens foram visualizadas diretamente no *site* e verificou-se que os radares que forneceram imagens satisfatórias (tendo em conta a boa visibilidade da zona em estudo) foram o *L8 OLI/TIRS*, o *Landsat 7 ETM+ SLC On* e o *Landsat 4 and 5 TM*. Procedeu-se ao *download* dos resultados referentes a estas quatro plataformas, seguido de uma análise detalhada das imagens. A Tabela 1 apresenta características pertinentes relativas ao sensor de *Landsat 8*, sendo apresentado no Anexo 1 uma tabela complementar das especificidades dos quatro satélites.

Tabela 1 - Parâmetros de processamento dos dados medidos pelos sensores de *Landsat 8*

Tipo de processamento	Nível 1T – os dados provenientes dos sensores são processados, sofrendo correções e calibrações segundo uma projeção cartográfica, tendo em conta possíveis deslocamentos do solo.	
Tamanho do píxel	OLI	Bandas multiespectral: 30 m
		Banda pancromática: 15 m
	TIRS – bandas térmicas: 100 m	
Características dos dados	Formato: GeoTIFF	
	WGS 84 datum	
	Valor de 16-bit de píxeis	

Fonte: adaptado de *Landsat 8 Handbook*

Site Scihub

O site *Sentinels Scientific Data Hub – Scihub* – permite ter acesso aos produtos obtidos nas missões Sentinel-1 e Sentinel-2. No momento da pesquisa realizada neste *site*, solicitaram-se os produtos de ambas as missões, contudo apenas a primeira forneceu imagens de interesse. De entre os diversos objetivos da missão Sentinel-1, destaca-se o apoio na monitorização marinha, incluindo derrames de óleo e outras situações de risco. Esta missão é composta por dois satélites (Sentinel-1A, lançado no início de 2014, e Sentinel-1B, em 2016) com a mesma órbita polar; está equipada com um instrumento SAR capaz de operar em diferentes comprimentos de onda (λ), o que possibilita a aquisição de imagens durante 24 horas por dia, independentemente das condições climáticas; opera numa faixa de frequência nominal do espectro eletromagnético entre os 8 e os 4 GHz, que equivale a um λ entre os 3,75 e os 7,5 cm (banda C), o que proporciona medições rápidas e precisas para georreferenciação; estes radares permitem produzir imagens em duas dimensões: o alcance e o azimuth (este último corresponde à trajetória da plataforma que contém o radar a bordo). Esta missão opera em quatro modos de aquisição, sendo estes *Stripmap* (SM), *Interferometric Wide swath* (IW), *Extra-Wide swath* (EW) e *Wave* (WV), sendo posteriormente feito um processamento em três níveis diferentes, o nível-0 (dados reconstruídos não processados), o nível-1 (dados em nível-0 transformados através da aplicação de uma série de algoritmos e calibrações) e o nível-2. Aquando da pesquisa, não se restringiram os tipos de aquisição ou os níveis, solicitando toda a informação disponível no período de tempo e zona definidos. Contudo, as imagens encontradas eram todas de nível-1. Os produtos de nível-1 podem ser *Single Look Complex* (SLC) ou *Ground Range Detected* (GRD) e, quanto à resolução, podem ser *Full Resolution* (FR), *High Resolution* (HR) e *Medium Resolution* (MR) (Sentinel-1 Team, 2013).

Os produtos SLC de nível-1 têm apenas uma direção de observação em cada dimensão, são georreferenciados a partir da órbita e atitude dos dados obtidos via satélite e corrigidos tendo em conta o atraso de azimuth, a elevação da antena e a perda de alcance (Sentinel-1 Team, 2013). A resolução destes produtos é determinada pelo modo de aquisição, sendo estes apresentados na Tabela 2 para as imagens SLC.

Tabela 2 - Resolução dos modos de aquisição dos produtos SLC de nível-1

<i>Modo de aquisição</i>	<i>Resolução (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Espaçamento de píxeis (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Número de looks*</i>	<i>ENL**</i>
SM	1,7×4,3 a 3,6×4,9	1,5×3,6 a 3,1×4,1	1×1	1
IW	2,7×22 a 3,5×22	2,3×17,4	1×1	1
EW	7,9×43 a 15×43	5,9×34,7	1×1	1
WV	2,0×4,8 e 3,1×4,8	1,7×4,1 e 2,7×4,1	1×1	1

*Número de *looks*: número de direções de observação

**ENL: *Equivalent number of independent looks* (número equivalente de “looks” independentes)

Fonte: Sentinel.esa.int

Os produtos GRD de nível-1 são considerados *multi-looked* (o que significa que opera em várias direções de observação) e são dados projetados ao nível do solo usando o modelo WGS84. Os píxeis das imagens adquiridas representam a magnitude detetada. Para uma melhor qualidade da imagem, é removido qualquer ruído térmico. Como possui mais direções de observação, i.e., o melhoramento em resolução radiométrica ao usar múltiplas observações (*multi-looks*) associa-se a uma degradação da resolução espacial. Neste caso, a resolução dos produtos diminui, face aos produtos SLC de nível-1. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os valores respetivos para cada resolução e modo correspondente para os produtos GRD.

Tabela 3 - Produtos GRD de nível-1 *FR*

<i>Modo de aquisição</i>	<i>Resolução (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Espaçamento de píxeis (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Número de looks</i>	<i>ENL</i>
SM	9×9	4×4	2×2	3,9

Fonte: Sentinel.esa.int

Tabela 4 - Produtos GRD de nível-1 *HR*

<i>Modo de aquisição</i>	<i>Resolução (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Espaçamento de píxeis (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Número de looks</i>	<i>ENL</i>
SM	23×23	10×10	6×6	34,4
IW	20×22	10×10	5×1	4,9
EW	50×50	25×25	3×1	2,9

Fonte: Sentinel.esa.int

Tabela 5 - Produtos GRD de nível-1 *MR*

<i>Modo de aquisição</i>	<i>Resolução (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Espaçamento de píxeis (alcance × azimuth) (m)</i>	<i>Número de looks</i>	<i>ENL</i>
SM	84×84	40×40	22×22	350 - 398
IW	88×87	40×40	22×5	105,7
EW	93×87	40×40	6×2	12,7
WV	52×51	25×25	13×13	123,7

Fonte: Sentinel.esa.int

Salienta-se que os produtos em estudo são imagens SAR da missão Sentinel-1 do tipo GRD de nível 1 de *High Resolution* (HR) cujo modo de aquisição é o IW, sendo considerada no processamento dos dados a informação do espaçamento dos píxeis (10 metros equivalem a 1 píxel).

3.1.1. Parâmetros definidos na pesquisa de imagens

A zona em estudo, definida aquando da pesquisa de imagens de satélite, compreende um total de dois setores principais, sendo estes Aveiro e Figueira da Foz. A delimitação da área engloba uma extensão da superfície oceânica superior a 40 km (limite até ao qual são aplicáveis as considerações efetuadas na metodologia) e uma estreita porção de solo terrestre como referência visual. A Figura 3 apresenta um mapa de Portugal onde é visível a área definida aproximada (a vermelho). De notar que cada imagem disponível nos *sites* é resultado de uma combinação de várias faixas de imagens recolhidas pelos satélites aquando do seu trajeto espacial, atendendo à zona de interesse como um dos *inputs*. A Tabela 6 apresenta as coordenadas dos vértices do polígono que corresponde à área estudada. O intervalo de tempo definido no primeiro *site* foi desde o dia 1 de janeiro de 2000 até 7 de março de 2016 e no segundo *site* estipulou-se o período de 3 de janeiro de 2000 a 23 de março de 2016.

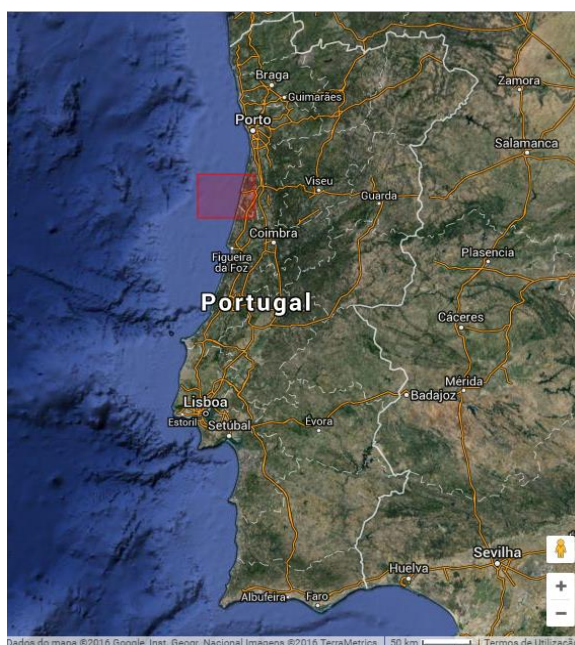


Figura 3 - Mapa de Portugal apresentando a área em estudo.
Fonte: site EarthExplorer

Tabela 6 - Coordenadas geográficas dos pontos dos polígonos delimitadores da área em estudo (*datum* WGS84)

Site	Pontos	Longitude	Latitude
Earth Explorer	A	-8,6097	40,7878
	B	-9,2317	40,7878
	C	-9,2317	40,4125
	D	-8,6097	40,4125
SciHub	A	-9,8951	39,7700
	B	-8,3245	39,7700
	C	-8,3245	40,9800
	D	-9,8951	40,9800

3.1.2. Exportação de imagens

O acesso aos dados científicos de ambos os *sites* é gratuito e livre, sendo apenas necessário um registo básico com entrada imediata. O *download* das imagens de satélite é efetuado de uma forma intuitiva e a visualização e manipulação das mesmas é feita recorrendo a programas específicos (o *Google Earth*, para o primeiro *site*, e o SNAP, no caso do segundo *site*). Relativamente ao *site Earth Explorer*, os resultados obtidos podem ser descarregados em diversos formatos, consoante o objetivo do utilizador. No presente caso, os dados foram exportados em formato ‘-.KMZ’, extensão que armazena informação geográfica e pode ser visualizada no *Google Earth*. Os dados descarregados do *site Scihub* são compostos por pastas que contêm diversas informações referentes a cada imagem (em formato ‘-.TIFF’), incluindo georreferenciação e calibrações efetuadas. Neste caso, é essencial o programa SNAP – plataforma de aplicação *Sentinel* – que está inserido na STEP (uma plataforma de ferramentas de exploração científica da ESA) que permite uma rápida visualização e navegação de imagens de tamanho elevado, uma sobreposição de camadas (até mesmo bandas de várias imagens), uma orto-retificação precisa de projeções, uma geocodificação através de pontos de controlo do solo (*Ground Control Points* – GCP), entre outras funcionalidades. Este programa tem que ser descarregado pelo utilizador.

No presente trabalho, um dos desafios foi, precisamente, o manuseamento destas imagens devido à sua dimensão, que pode variar de 1,6 a 7GB. De notar que após a exportação, as imagens estavam invertidas, em alguns casos referente à horizontal e noutros à vertical, não sendo possível rodá-las. A razão destas inversões poderá, eventualmente, dever-se à posição do sensor no momento da aquisição.

3.1.3. Critérios de seleção de imagens

Para a catalogação das imagens exportadas foram criadas tabelas, tendo em conta vários critérios nomeadamente: (i) área abrangida pelas imagens; (ii) presença evidente de swell; (iii) proximidade temporal entre as imagens que respeitassem um ou mais critérios anteriores; (iv) datas de campanhas de campo para obtenção de batimetria por métodos tradicionais (embarcação com ecosonda). No que diz respeito ao primeiro *site*, a pesquisa devolveu cerca de 630 resultados, e após proceder-se à sua análise, reuniram-se 101 imagens com real interesse, 30 das quais satisfazem o conjunto de critérios pretendidos. Criaram-se dezassete tabelas, para cada ano, de 2000 a 2016, incluindo os dias e os meses em que se organizaram as imagens, tendo em conta o número e o satélite correspondente. Relativamente ao segundo *site*, a pesquisa resultou em cerca de 880 imagens e, após várias análises, apenas 65 apresentam as condições necessárias para o estudo em questão. A organização destas imagens foi, primeiramente, efetuada atendendo ao nome, à data, ao estado da visibilidade do swell (muito fraco, fraco, bom, muito bom), à zona (setores de Aveiro ou da Figueira da Foz), ao instrumento (sendo SAR-C para todos os casos) e ao satélite

(Sentinel-1). Numa segunda avaliação, criou-se uma nova tabela onde se ordenaram as imagens pelas datas, atendendo aos anos (2014, 2015 e 2016), meses e dias, incluindo a informação relativa ao estado do *swell* e à zona abrangida. Nos Anexos 2 e 3, encontram-se as tabelas referidas à organização das imagens extraídas do site *Scihub*. A etapa do processamento cingiu-se apenas a seis imagens (denominadas 178a, 01d0, 2ece, 07c8, 6b42 e 19a7) por se considerarem as mais adequadas ao estudo pela proximidade temporal entre si e às campanhas de campo realizadas como uma forma de comparação e validação dos dados e resultados a obter.

3.2. Processamento das imagens

A manipulação e o tratamento das imagens efetuaram-se recorrendo essencialmente a três algoritmos (*Getsubimagens.m* – permite selecionar uma subsecção da imagem; *CalcWavelengthGrid.m* – usa a técnica de FFT para calcular diversos parâmetros referentes às características da onda; *PixelToGroundCoords.m* – fornece informação georreferenciada das subimagens) elaborados no *software* Matlab por Cunha (2016). Nesta etapa, são consideradas determinadas características de cada imagem, nomeadamente a dimensão e o número de píxeis, 210 dos quais estão georreferenciados, os GCP (*Ground Control Points*). Estes pontos de controlo são dispostos sobre as imagens como uma máscara e diferem tenuemente em cada caso, pelo facto de a área ilustrada não ser exatamente a mesma, apesar de bastante aproximada. Cada imagem total tem, aproximadamente, uma dimensão de 25484 por 16719 píxeis (larg. x alt.).

Algoritmo *Getsubimagens.m*

Com o objetivo de limitar o estudo ao setor Praia de Mira-Aveiro, esta rotina constitui uma *interface* que devolve uma dada secção da imagem total. Numa primeira abordagem, esta secção abrange uma área que se estende da costa ao largo (extensão de aproximadamente 70 km de oceano). Numa segunda abordagem, a zona em estudo considerada é a mesma, limitando-a mais junto à costa (cerca de 30 km da costa ao largo). A rotina lê a imagem, sendo fornecida informação acerca dos 210 GCP, ou seja, as coordenadas geográficas (longitude e latitude) e os píxeis X e Y correspondentes. Efetuaram-se adaptações no algoritmo de maneira a selecionar a zona em estudo: (i) definiram-se dois pontos que constituem os cantos superior esquerdo e inferior direito que limitam a área da imagem de interesse a ser extraída e (ii) incluiu-se um ciclo que identifica os GCP mais próximos deste par de pontos. De notar que os píxeis da imagem original não estão todos georreferenciados, razão pela qual a área final obtida depende dos GCP existentes em cada caso, o que também implica que as imagens extraídas não sejam exatamente as mesmas para cada caso. Por fim, esses pontos encontrados são representados e são devolvidos dois ficheiros, um em formato '.tiff', cuja imagem é o

setor definido, e um ficheiro ‘.txt’ com os píxeis do par de pontos seleccionados que a rotina “encontrou”. De salientar que a primeira área das imagens extraídas inclui 14 GCP (domínio mais ao largo), enquanto a segunda zona de interesse contém apenas 8 GCP (domínio mais junto à costa). A escolha destes dois conjuntos de GCP deveu-se ao facto de, para 14 GCP, a área retirada da imagem total englobar uma extensão que permite, *a posteriori*, considerar o comprimento de onda para águas profundas que se mantém constante em oceano aberto. No caso dos 8GCP, trata-se do número mínimo de pontos para o qual a aplicação dos três algoritmos funciona, i.e., 6 GCP é um número tão reduzido que não permite que o algoritmo *PixelToGroundCoords.m* calcule a georreferenciação das subimagens.

Algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*

Esta rotina baseia-se no método FFT2 – *Fast Fourier Transform* bidimensional que devolve a transformada discreta de Fourier de uma matriz, neste caso concreto, calculada a partir de um algoritmo da transformada rápida de Fourier (The MathWorks). A FFT é uma ferramenta computacional eficiente que decompõe e simplifica a análise de um sinal, seja este de energia do espectro eletromagnético (Cochran *et al.*, 1967), uma vez que reduz o número de computações necessárias. No caso de uma imagem, i.e., não existindo propagação no tempo, mas sim no domínio do espaço, é analisado um sinal sinusoidal bidimensional, considerando as frentes de onda que se propagam com uma determinada direção e com um determinado comprimento de onda. Recorrendo à FFT, esta dá origem a dois impulsos relevantes, denominados deltas de Kronecker (Cunha, 2016), uma vez que os períodos dos dados analisados são separados em componentes complexas de frequências positivas e negativas (Weisstein). A distância entre estes dois “picos” relaciona-se com o comprimento de onda do sinal, e o sentido dos impulsos alinhados refere-se à direção de propagação (Cunha, 2016).

Essencialmente, esta rotina define uma célula que percorre a imagem da esquerda para a direita, começando no topo e terminando na base (dimensão da célula e o seu incremento são implementados inicialmente pelo utilizador) e recorre ao método FFT2 para determinar o comprimento de onda e a direção de propagação das ondas (ou rumo), em cada célula. Os argumentos de entrada são a imagem a analisar, um escalar que corresponde ao número de metros por píxeis (*MetersPerPixel*), e dimensão da célula, em metros (*CellSize*), e o incremento que corresponde ao “salto” dado pela célula, em metros (*GridSpacing*). Os argumentos de saída são os seguintes: (i) uma matriz *X* com as posições horizontais do centro de cada célula (em metros), sendo a origem o canto superior esquerdo da imagem; (ii) uma matriz *Y* semelhante à anterior, mas com as posições verticais; (iii) uma matriz *Lambda* com o comprimento de onda calculado (em metros) em cada célula; (iv) uma matriz *Alpha* com o rumo determinado em cada célula (em graus), tendo em conta que este ângulo é definido positivamente e no sentido anti-horário e que os 0° se referem à direção horizontal para a direita; (v)

uma matriz *Quality* que constitui um indicador qualitativo por intermédio de uma escala de cores de fiabilidade dos valores calculados e descritos anteriormente, ou seja, indica a qualidade da solução obtida pela FFT em cada seção quadrada, cujos valores e significado são os seguintes: 0=mau (vermelho), 1=fraco (rosa), 2=razoável (amarelo), 3=bom (ciano), 4=muito bom (azul), 5=excelente (verde). A rotina começa por interpretar quantitativamente a imagem, atendendo à intensidade dos tons de cinzento da superfície, i.e., os tons mais claros (quase brancos) correspondem às cavas das ondas e os tons cinza mais escuros referem-se às cristas das ondas, obtendo-se assim uma matriz de base para este processamento. Daí, a importância de um *swell* bem visível que permite fazer este tipo de análise. Em seguida, a imagem é dividida em pequenas células em função dos argumentos de entrada definidos inicialmente, e começa a processar cada porção da imagem. Este processamento consiste na aplicação do método FFT2 para determinar o *Lambda* (λ) e o *Alpha* (α) das ondas predominantes, ignorando os sinais secundários, em cada uma destas células. Para isso, são detetados e considerados os dois picos de magnitude principais referidos anteriormente e aplicadas as seguintes equações:

$$a = |n_1 - n_2|/2N$$

$$b = |m_1 - m_2|/2M$$

$$\lambda = \text{MetersPerPixel} / \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\alpha = \text{atan2}(n_1 - n_2, m_1 - m_2) \times 180/\pi, \quad \text{se } m_1 > m_2$$

$$\alpha = \text{atan2}(n_2 - n_1, m_2 - m_1) \times 180/\pi, \quad \text{se } m_1 < m_2$$

Onde n_1 e m_1 referem-se à linha n e à coluna m de um dos picos, da mesma forma que n_2 e m_2 se referem ao segundo pico, N é o número de linhas de píxeis e M o número de colunas de píxeis da imagem, *MetersPerPixel* é o número de metros por pixel. De notar que se aplicou a função *atan2*, a tangente inversa (arco-tangente) do quarto quadrante, de forma a obter valores reais.

Relativamente ao índice de qualidade, a rotina inspeciona a fiabilidade dos picos através de cálculos métricos de qualidade cujos níveis variam de 0 a 5 (mencionados previamente), dependendo do intervalo de valores em que recaem estes cálculos: se o valor métrico for igual ou superior a 20, a qualidade corresponde a 5 (excelente), caso o valor seja igual ou inferior a 10, tem-se um resultado mau (0). Por fim, para além dos quatro argumentos de saída referidos, é exibido um gráfico com a imagem (invertida, tal como no momento da sua exportação), tendo sobrepostos vetores de cores em que a extremidade representada por um ponto corresponde ao centro de cada célula, o tamanho do vetor é proporcional ao comprimento de onda (quanto mais pequeno, menor é o λ), a direção refere-se ao rumo e a cor do ponto é o indicador de qualidade.

Algoritmo *PixelToGroundCoords.m*

Uma vez que o processamento das imagens considera apenas o número de píxeis, torna-se necessário georreferenciá-las. Esta rotina determina as coordenadas georreferenciadas dos pontos de uma imagem. Os argumentos de entrada dizem respeito à imagem recortada e correspondem a: (i) uma matriz que contém as coordenadas horizontais e verticais dos pontos da imagem, ambas em píxeis, e (ii) a um ficheiro '.txt' com a informação dos 14 ou 8 GCP que definem a imagem extraída, ou seja, trata-se de uma grelha de pontos com as suas coordenadas geográficas e as suas coordenadas X e Y, em píxeis, correspondentes. No fim, o algoritmo devolve uma matriz, cujas dimensões são as mesmas da matriz de entrada, com as coordenadas geográficas correspondentes, efetuando uma interpolação através de uma função polinomial bidimensional. Tomando como exemplo a subimagem 178a junto à costa, a rotina *CalcWavelengthGrid.m* devolve uma matriz λ de dimensão 36×73 (equivalente a um total de 2628) e, por conseguinte, a matriz de coordenadas, em píxeis, como argumento de entrada do algoritmo *PixelToGroundCoords.m*, vai ter o mesmo número total de valores, divididos em duas colunas, referentes à longitude e à latitude a determinar. De notar que, uma vez que todos os pontos, em píxeis, da imagem estão contidos na grelha dos GCP, não é realizada nenhuma extrapolação.

3.3. Determinação da batimetria

A abordagem considerada para determinar a profundidade do fundo oceânico (h) atende ao conjunto de valores do comprimento de onda (λ) e ao comprimento de onda para águas profundas (λ_0), partindo da relação de dispersão linear das ondas:

$$\lambda/T = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2)$$

onde T é o período da onda, g a aceleração da gravidade, k o número de onda.

Sabendo que $k = 2\pi/\lambda$ e que o comprimento de onda em águas profundas é dado por:

$$\lambda_0 = gT^2/2\pi \quad (3)$$

obtém-se da Equação (2):

$$\lambda/\lambda_0 = \tanh(kh) \quad (4)$$

Por fim, a partir das Equações (3) e (4), é possível calcular a batimetria a partir da seguinte equação:

$$h = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{atanh}(\lambda/\lambda_0) \quad (5)$$

onde h é a profundidade de fundo expressa em metros, λ é o comprimento de onda, em metros, calculado pela técnica FFT, e λ_0 é o comprimento de onda em águas profundas, em metros (calculado pela Equação (3), tendo em conta os valores do período de pico, T_p , medidos pela boia ondógrafo de Leixões).

Em suma, a profundidade, h , é determinada a partir da Equação (5) e considera as matrizes λ calculadas pelo algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*, descrito anteriormente, e o comprimento de onda para águas profundas. O valor de λ_0 é determinante para a precisão do cálculo de h . Este valor foi estimado de diferentes formas. Foi obtido, considerando dados observados, através da Equação (3) que considera o T_p , medido pela boia ondógrafo de Leixões. Atendendo aos valores do T_p mínimo, médio, máximo e numa hora próxima ao momento de aquisição de cada imagem, calcularam-se os λ_0 correspondentes, ou seja, o comprimento de onda mínimo, médio, máximo e próximo à hora de aquisição para águas profundas. Determinou-se, ainda, um λ_0 médio estimado diretamente em cada subimagem para profundidades superiores a 200 metros no gráfico que representa os valores da matriz λ estimada pela FFT georreferenciada e considerando apenas os valores com índice de qualidade excelente. A média deste conjunto de valores é denominada de λ_0 médio estimado a partir da imagem. Os λ_0 calculados a partir dos dados observados na boia de Leixões e estimados para cada imagem são substituídos na Equação (5). Os resultados são, posteriormente, representados e sobrepostos à cartografia batimétrica do Instituto Hidrográfico com o intuito de averiguar se o método testado permite estimar a batimetria para a zona de estudo e quais os valores de λ_0 que fornecem soluções mais próximas das observadas.

CAPÍTULO 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dividido em três partes. Na primeira, apresentam-se alguns exemplos das imagens para duas regiões (ao largo e junto à costa) de forma a, posteriormente, comparar os resultados obtidos e compreender qual a situação a que a metodologia descrita se adequa. Numa segunda parte, expõem-se os resultados dos testes de sensibilidade do método do algoritmo *CalcWavelengthGrid.m* para explorar os parâmetros de entrada que definem o tamanho da célula e o incremento do salto dado por esta célula que percorre a imagem, para ambas as regiões. Numa terceira parte, explicita-se a determinação do comprimento de onda médio para águas profundas a partir de cada imagem. Por fim, numa quarta e última parte, apresentam-se os resultados da batimetria calculada e a comparação com a batimetria observada pelo Instituto Hidrográfico.

4.1. Imagens analisadas

Nesta secção, são analisadas as imagens totais *178a* e *07c8*, duas das seis, sobre as quais se efetuou o processamento descrito no Capítulo 3, e as subimagens extraídas para o caso da zona ao largo (cerca de 70 km de extensão de oceano) e da zona junto à costa (aproximadamente 30 km em direção ao largo) (Figuras 4-11). Consideram-se, portanto, dois domínios da imagem total: mais ao largo e junto à costa. As Figuras 5 e 7 apresentam secções da imagem *178a* com a localização dos GCP (referidos na secção 3.2, Capítulo 3) que delimitam as subimagens *178a* mais ao largo e junto à costa, respetivamente. As restantes imagens são apresentadas em anexo (Anexos 4-7). Verifica-se que as subimagens abrangem aproximadamente a mesma área, contudo algumas incluem a Barrinha de Mira, enquanto noutras é visível a embocadura da laguna de Aveiro. Tal facto deve-se ao posicionamento dos GCP, que não é exatamente o mesmo para cada caso, como referido anteriormente na descrição dos algoritmos. Apesar de, no momento de exportação, as imagens estarem invertidas, nesta secção, são exibidas na orientação correta. De notar que as imagens têm orientações diferentes, i.e., a *178a* tem uma inclinação a tender para Este (assim como as imagens *01d0* e *2ece*) e na *07c8* a terra é apresentada precisamente na vertical (equivalente a *19a7* e *6b42*).

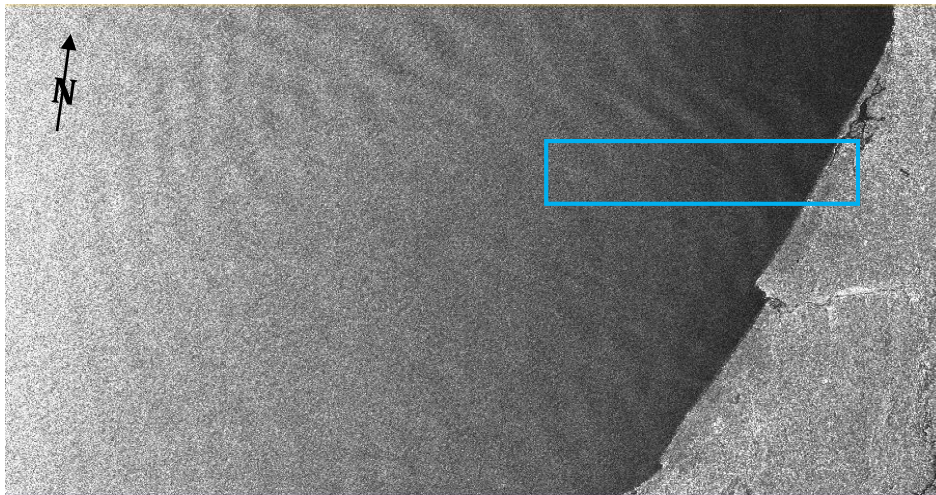


Figura 4 - Imagem 178a total. O retângulo azul ilustra a área de subimagem 178a ao largo

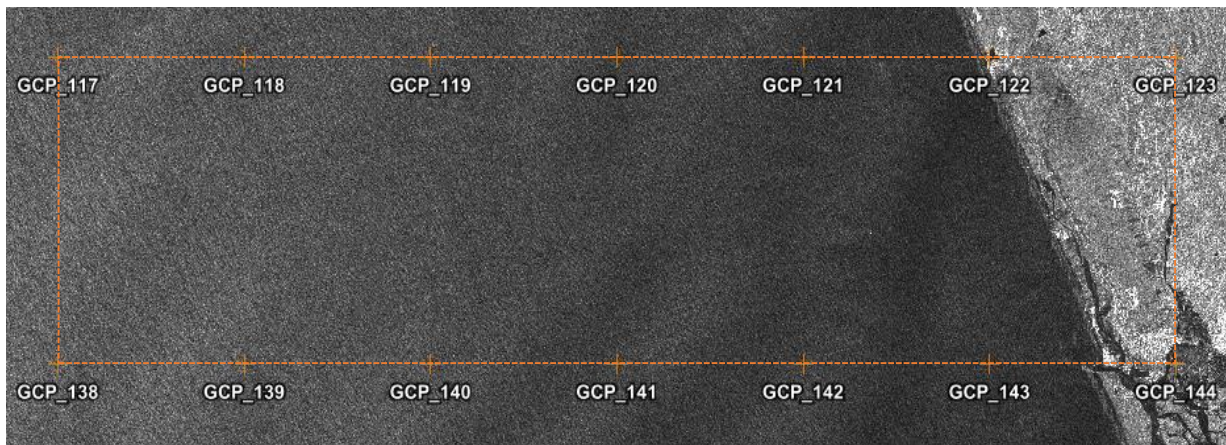


Figura 5 – Secção da imagem 178a invertida que apresenta o limite da subimagem 178a mais ao largo com a localização dos GCP (a cor de laranja)

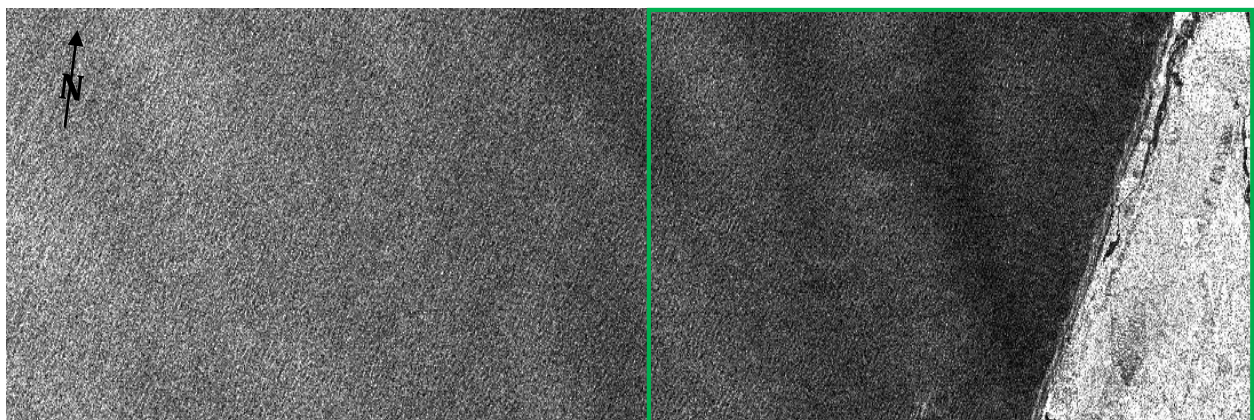


Figura 6 – Subimagem 178a ao largo. O retângulo verde ilustra a área da subimagem 178a junto à costa

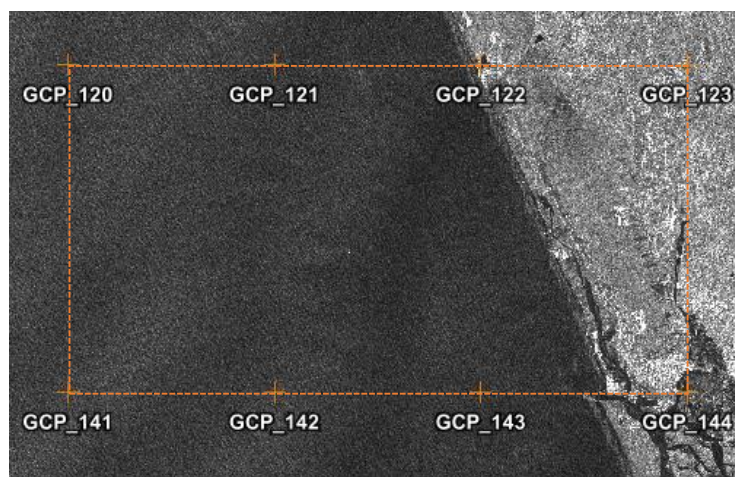


Figura 7 - Secção da imagem 178a invertida que apresenta o limite da subimagem 178a junto à costa com a localização dos GCP (a cor de laranja)



Figura 8 - Subimagem 178a (domínio junto à costa)

A data de aquisição via satélite da imagem 178a é de 17 de fevereiro de 2015. As subimagens 178a extraídas abrangem a parte norte da Barrinha de Mira e estendem-se até à zona imediatamente a sul da entrada da laguna de Aveiro.

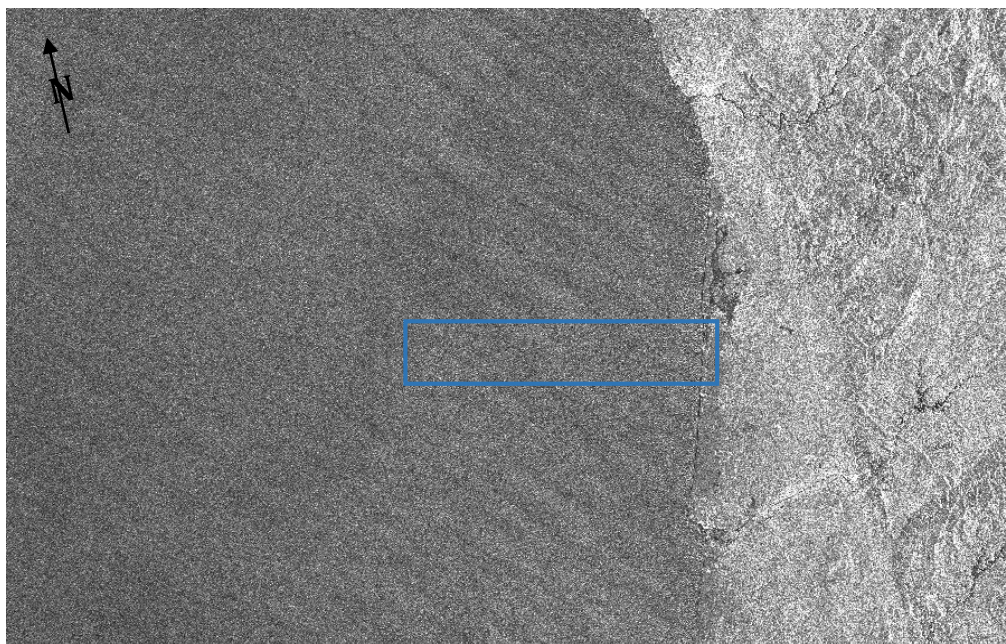


Figura 9 - Imagem 07c8 total. O retângulo azul delimita a área da subimagem 07c8 ao largo

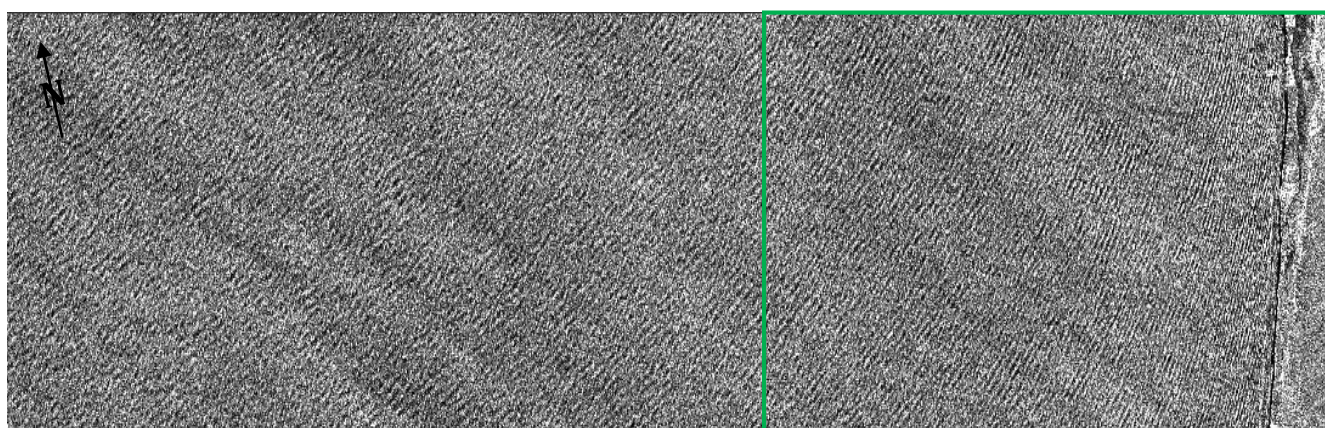


Figura 10 - Subimagem 07c8 ao largo. O retângulo verde ilustra a subimagem 07c8 junto à costa

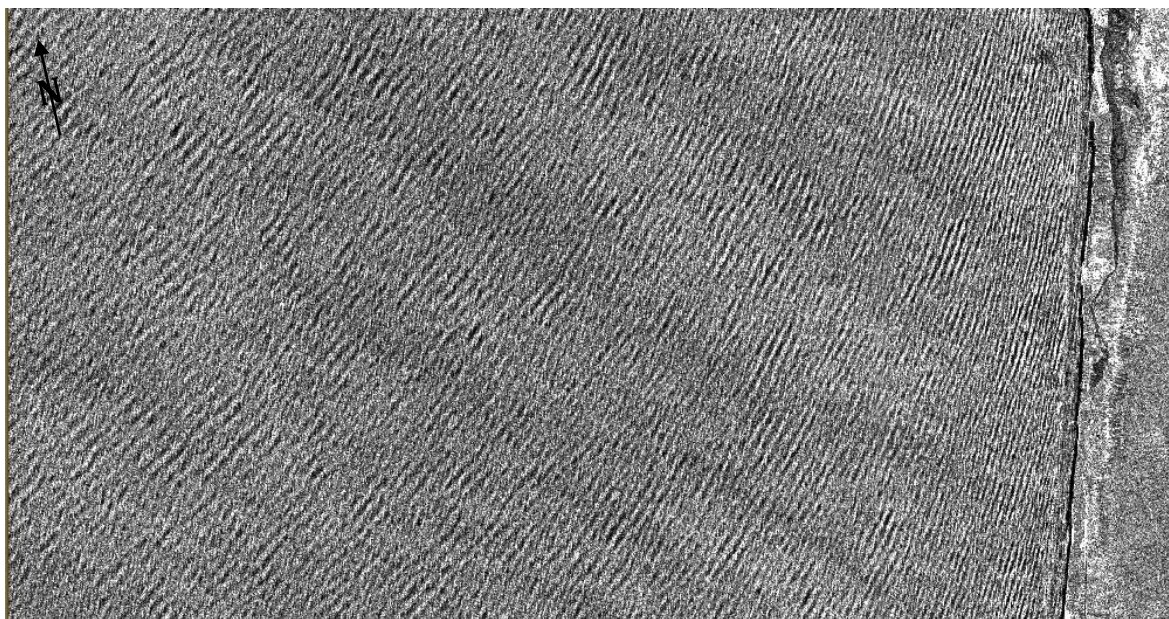


Figura 11 - Subimagem 07c8 junto à costa

As subimagens de 07c8 (domínios ao largo e junto à costa) expõem uma área que se estende desde a zona sul da embocadura da laguna de Aveiro até imediatamente a norte da Barrinha de Mira.

Nas Figuras 8 e 11 (domínio junto à costa), a ondulação é bem visível e é facilmente perceptível uma predominância da ondulação proveniente de noroeste. Constata-se, ainda, que com a aproximação à costa ocorre uma diminuição do comprimento de onda, assim como uma tendência das frentes de onda se orientarem paralelamente à costa, como seria de esperar. As condições descritas verificam-se em todas as imagens, sendo que a subimagem 07c8 junto à costa (Figura 11) é um exemplo claro destas características de agitação marítima.

4.2. Testes de sensibilidade do algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*

Foram efetuados testes de sensibilidade no algoritmo *CalcWavelengthGrid.m* a fim de compreender as implicações dos parâmetros de entrada definidos nos resultados obtidos. Variou-se a dimensão lateral da célula (*CellSize*) que percorrerá a imagem e o incremento que corresponde ao salto dado pela célula (*GridSpacing*). O comprimento de onda típico de uma onda a propagar-se no oceano e antes da aproximação à costa é cerca de 200 metros. Como tal e tendo em conta que o método da FFT analisa estes sinais abrangidos em cada célula, começou por considerar-se uma célula de 4000 metros de lado, atribuindo diferentes valores ao incremento desde os 200 até aos 700 metros. O método foi ainda testado para células de menor (2000 metros de lado) e maior dimensão (6000 metros), variando o incremento, e no fim compararam-se os resultados. Note-se que na presente secção a designação de subimagem ao largo refere-se à secção da imagem total saída em que se considerou 14GCP (aquando da aplicação do algoritmo *GetSubimagens.m*, descrito na secção 3.2. do Capítulo 3), enquanto as subimagens junto à costa foram extraídas tendo em conta os 8GCP (explicitado na secção 3.2. do terceiro Capítulo).

Numa primeira abordagem analisaram-se as subimagens que exibem o domínio mais ao largo. Em seguida, apresenta-se o resultado obtido pela aplicação do algoritmo para a subimagem *2ece* ao largo, considerando um incremento de 500m e a célula de 4km de lado (Figura 12) e um *zoom* aplicado este caso (Figura 13).

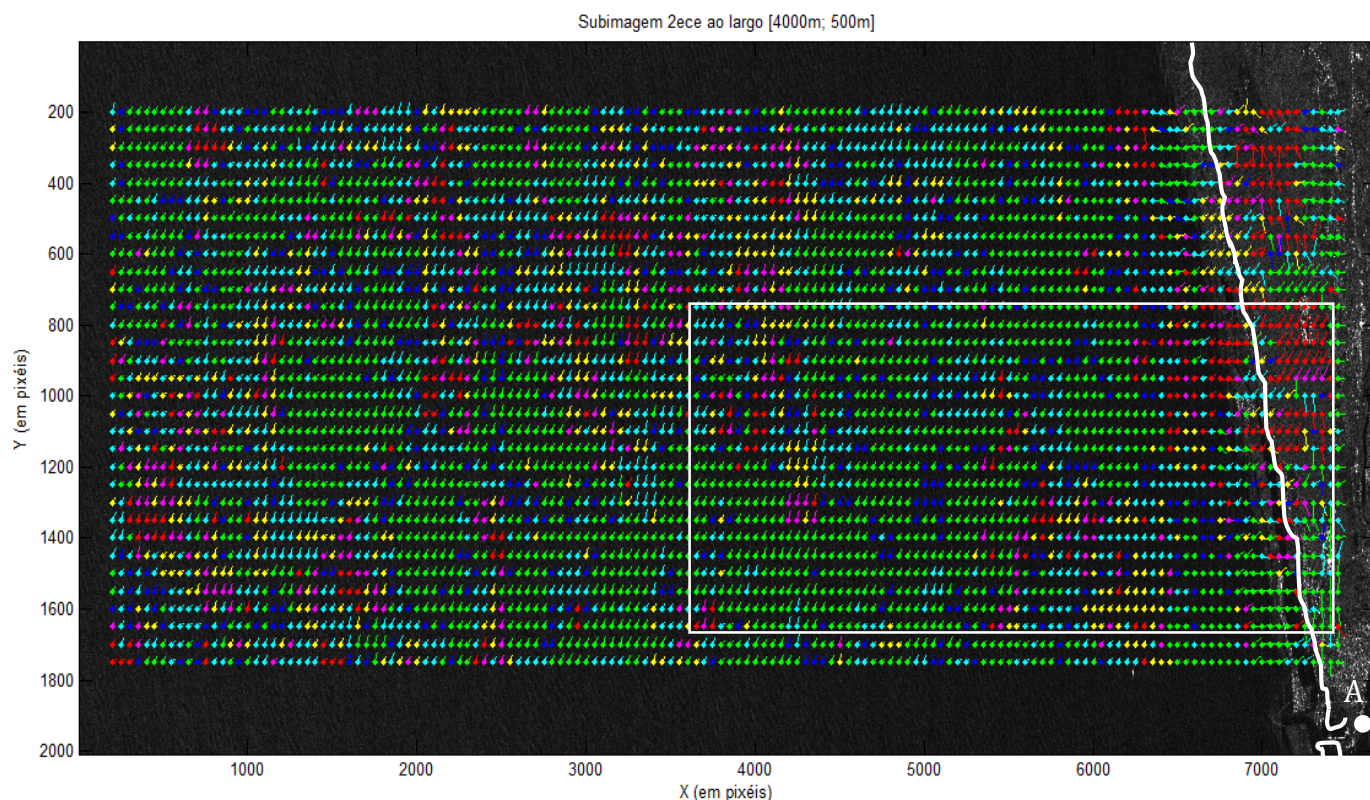


Figura 12 - Gráfico dos vetores de qualidade sobreposta à subimagem *2ece* ao largo (invertida) em que *CellSize*=4000 metros e *GridSpacing*=500 metros. Esquema de cores: vermelho=mau; magenta=fraco; amarelo=razoável; ciano=bom; azul=muito bom; verde=excelente. O retângulo branco ilustra a seção da imagem sob a qual se aplicou um *zoom*, exposta na Figura 13. A linha branca corresponde à linha de costa. O ponto *A* assinala a entrada da laguna de Aveiro

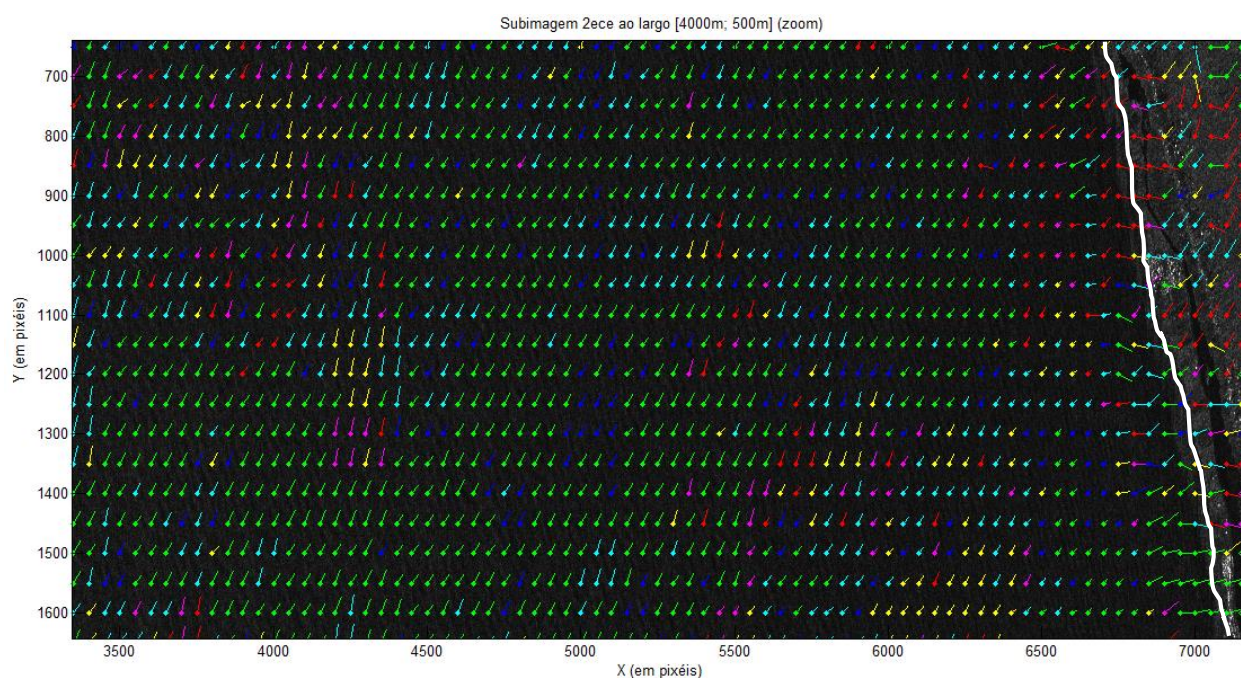


Figura 13 - Gráfico dos vetores de qualidade sobreposta à subimagem *2ece* ao largo (invertida) com *zoom* aplicado, em que *CellSize*=4000m e *GridSpacing*=500m. Esquema de cores igual ao da Figura 12.

A Figura 12 ilustra os vetores de qualidade sobrepostos à subimagem *2ece* ao largo (imagem invertida) (*CellSize*=4000 metros e *GridSpacing*=500 metros). A origem dos vetores coincide com o centro de cada célula, sendo que o espaçamento entre dois pontos consecutivos equivale a 500 metros, a direção do vetor indica a direção de propagação da ondulação e o comprimento do vetor o valor do comprimento de onda. A imagem está invertida, sendo que a entrada da laguna de Aveiro (ponto A) se localiza na parte inferior da imagem e a zona a norte da Barrinha de Mira se encontra na parte superior. Analisando este gráfico, salienta-se a existência de vários setores de vetores verdes face aos restantes de diferentes cores. No entanto, apesar de existirem vetores verdes (indicadores de excelente qualidade) na zona mais próxima da costa, os últimos cerca de treze pontos de cada linha horizontal (lado direito) apresentam valores errados de comprimentos de onda na gama dos 400 e 500 metros, sendo de esperar valores menores. Isto permite concluir que o índice de qualidade nem sempre estará correto e é necessário uma análise crítica dos valores de comprimento de onda obtidos para identificar a fiabilidade dos resultados. Constata-se que mais ao largo a direção de propagação da onda é predominantemente de noroeste e a sua dimensão equivale a um comprimento de onda mais elevado. Com a aproximação à zona costeira (Figura 13), ocorre uma redução da dimensão dos vetores e o seu direcionamento tende a tornar-se perpendicular à costa. Tais observações traduzem-se na diminuição do comprimento de onda e no direcionamento perpendicular à terra, i.e., num alinhamento da frente de onda com a costa, como seria expectável, tendo em conta os processos de refração que ocorrem neste domínio mais costeiro. As características da onda alteram-se em função da profundidade de fundo, como se verifica nas figuras anteriores, existindo, portanto, uma relação entre ambas.

Tendo por base o índice de qualidade descrito no Capítulo 3, constatou-se que, ao definir uma célula de 4 km de lado e um incremento de 500 metros, os valores de comprimento de onda calculados ao longo do setor em estudo (λ) são congruentes com o valor típico ao largo. No entanto, com a aproximação à costa, é esperado um encurtamento do comprimento de onda, o que não se verifica nos dados mais próximos da linha de costa calculados pelo algoritmo. Isto é explicado pelo facto de a célula abranger dados de terra, comprometendo, assim, os resultados.

Salienta-se que os resultados obtidos nesta etapa relativamente à subimagem *6b42* ao largo (não apresentada neste trabalho) ilustraram vetores de cor vermelha em praticamente toda a região, indicadores da baixa qualidade dos dados, pelo que os resultados referentes a este caso não foram considerados para a análise posterior.

Numa segunda abordagem, seguiu-se o mesmo procedimento dos testes de sensibilidade para todas as subimagens que exibiam o domínio junto à costa. A análise focou-se nos resultados obtidos para o caso da célula de 2 e 2,5km de lado, com um incremento de 500 metros. Apresenta-se, em seguida, os resultados obtidos para a

subimagem 2ece (junto à costa) para os casos da célula de 2 e 2,5km de lado (Figuras 14 e 15, respectivamente).

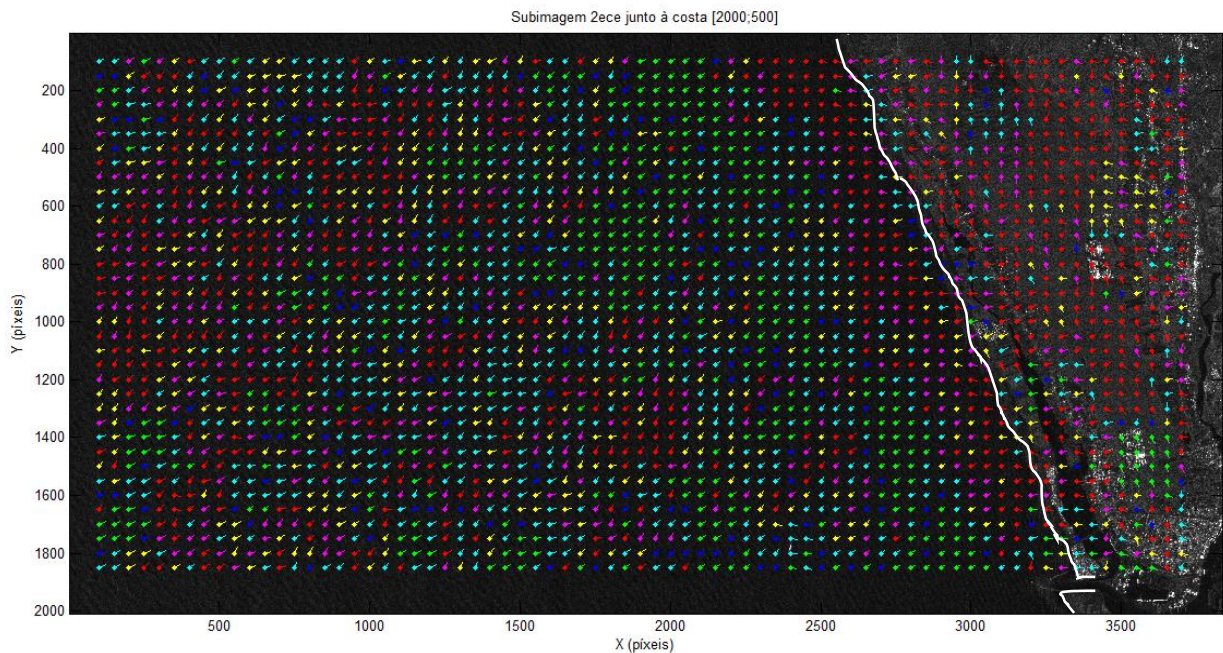


Figura 14 - Gráfico dos vetores de qualidade sobrepostos à subimagem 2ece junto à costa (invertida) em que $CellSize=2000m$ e $GridSpacing=500m$. Esquema de cores igual ao dos gráficos da Figura 12.

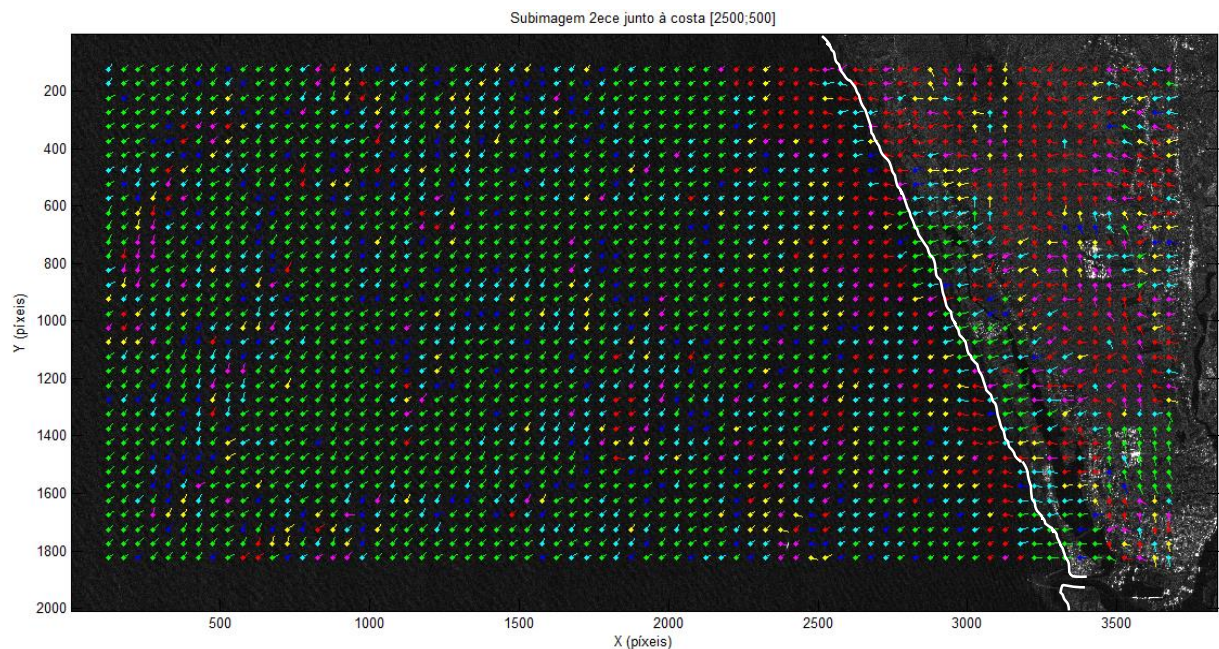


Figura 15 - Gráfico dos vetores de qualidade sobrepostos à subimagem 2ece junto à costa (invertida) em que $CellSize=2500m$ e $GridSpacing=500m$. Esquema de cores igual ao dos gráficos das Figura 12.

A análise das figuras permite concluir que o gráfico em que a célula tem 2,5km de lado (Figura 15) apresenta mais vetores de cor verde, face à solução da Figura 14, portanto é teoricamente de melhor qualidade. Quando se considera a célula maior (2,5km de lado), os valores de λ na zona mais ao largo variam sobretudo entre os 270 e os 290 metros (chegando a atingir os 310 metros), enquanto no caso da célula menor (2km de lado) o λ ronda os 230 e os 260 metros. Em ambos os casos, os pontos mais próximos de terra correspondem a valores de λ entre os 200 e os 300 metros. Relativamente à evolução da orientação e dimensão da cauda dos vetores com a aproximação à zona costeira, verifica-se um comportamento muito semelhante quer para a célula de 2km como para o de 2,5km de lado. Ao observar os valores de λ para os dois casos junto à costa, averigua-se que a gama de valores do comprimento de onda para a célula de 2,5km metros de lado é maior (muitos valores rondam os 320m) do que para a célula menor (λ máximo é 262m), apesar de não ser uma diferença muito significativa.

Em suma, quando se considera uma célula de 4km a componente mais ao largo das subimagens analisadas permite obter resultados mais satisfatórios, enquanto no caso em que se aplica uma célula de 2km e 2,5km de lado a componente mais costeira apresenta resultados mais próximos aos expectáveis.

Atendendo ao facto da técnica FFT (usada pelo algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*) considerar apenas os sinais dominantes de uma série espacial, despreza a restante informação contida em cada célula. Verificou-se que quando a célula é demasiado pequena (<2km de lado), não são analisados suficientes números de comprimentos de onda.

No que diz respeito ao incremento, ao longo da presente seção, são apenas apresentados os resultados obtidos da aplicação do incremento de 500m, apesar de se terem testado diferentes, como referido no início da presente secção. Verificou-se que se o incremento for muito pequeno (ex.: 100m) há muita sobreposição das células que conduz a informação redundante e o tempo de processamento é exageradamente elevado. No caso de o incremento ser demasiado elevado (ex.: 700m), há perda de resolução. Constatou-se que a aplicação do incremento de 500m é o mais indicado tendo em conta o comportamento da onda ao transitar de águas profundas para pouco profundas e o número de valores de λ que o algoritmo é capaz de devolver (para incrementos mais elevados, a matriz de λ calculada é menor).

4.3. Cálculo do λ_0 médio estimado pela imagem

Os parâmetros considerados na determinação da batimetria pelo método em estudo englobam o comprimento de onda para águas profundas (λ_0) médio estimado diretamente em cada imagem. O cálculo deste parâmetro tem em conta os valores da matriz do comprimento de onda (λ) obtidos ao longo de setor, considerando e fazendo a média dos valores que estão para além da isolinha dos 200 metros. Os pontos da matriz com índice de qualidade mau (igual a 0) são excluídos nesta estimativa. Para o caso da imagem *07c8*, o índice de qualidade da maior parte dos valores de λ é excelente (igual a 5). O λ_0 médio estimado em cada imagem é apresentado na Tabela 7. Nas Figuras 16 e 17 apresenta-se a projeção da matriz de pontos de λ sob a isolinha dos 200 metros observada pelo IH para as imagens *178a* e *07c8*, que apresentam o domínio mais ao largo. A escolha destas subimagens deve-se ao facto de terem orientações diferentes (referidas anteriormente na seção 4.1, do presente Capítulo) e ser perceptível a forma como esta estimativa foi efetuada para cada caso.

Tabela 7 -Valores de λ_0 médio estimado em cada imagem

	Imagem				
	<i>178a</i>	<i>01d0</i>	<i>2ece</i>	<i>07c8</i>	<i>19a7</i>
λ_0 médio estimado pela imagem (m)	306,1	371,3	283,1	437,4	269,2

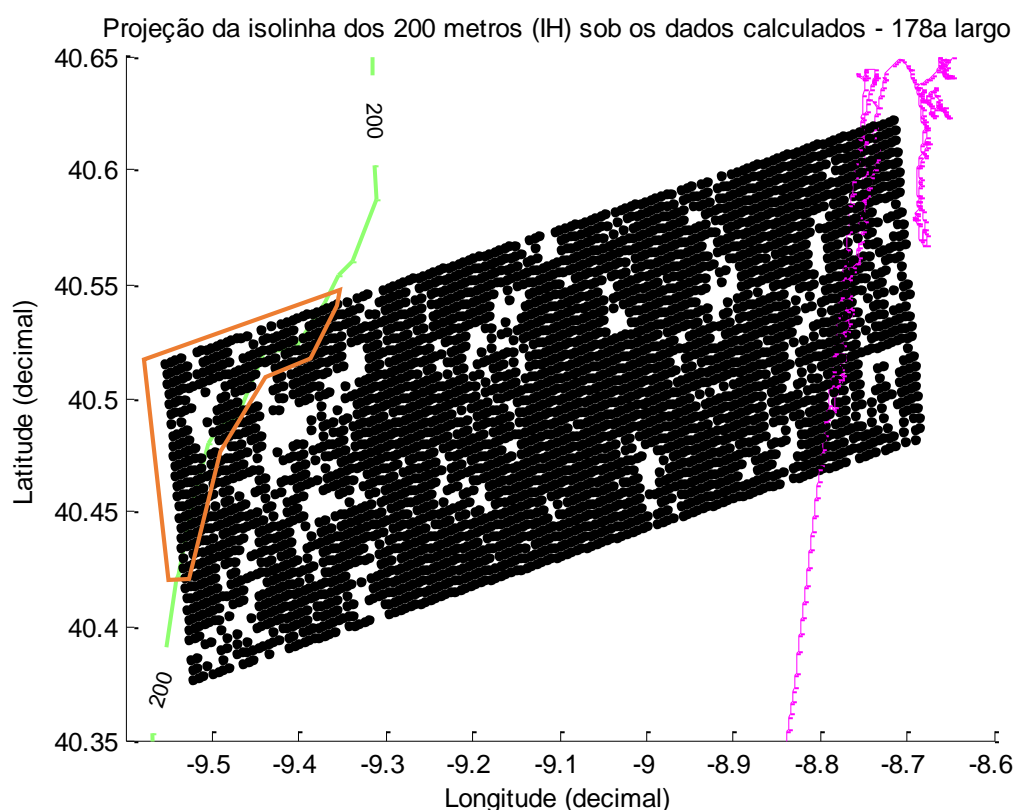


Figura 16 – Projeção da matriz de pontos de λ obtidos pelo método (a preto) sob a isolinha dos 200m observada pelo IH (a verde) para a subimagem 178a ao largo. Legenda: a linha a rosa representa a linha de costa, tendo a Norte a embocadura da laguna de Aveiro; a área a cor de laranja engloba os pontos considerados na estimativa do λ_0 média da imagem, aproximadamente.

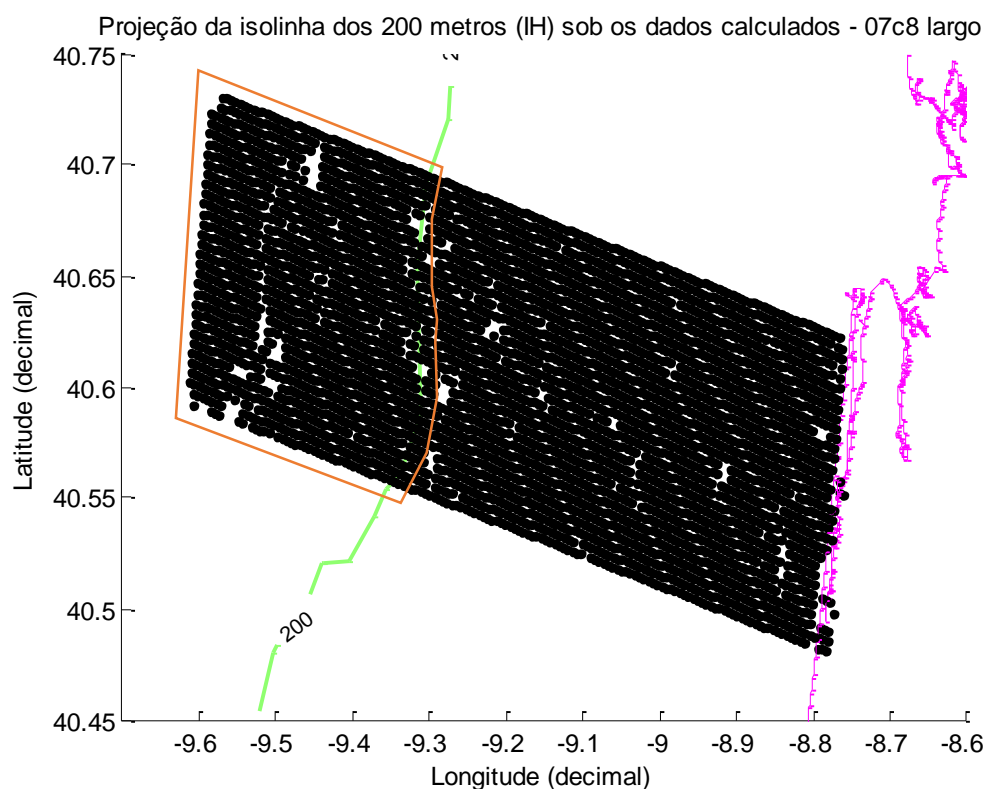


Figura 17 - Projeção da matriz de pontos de λ obtidos pelo método (a preto) sob a isolinha dos 200 metros observada pelo IH (a verde) para a subimagem 07c8 ao largo. Legenda: linha a rosa representa a linha de costa, tendo a Norte a embocadura da laguna de Aveiro; área a laranja engloba os pontos considerados na estimativa do λ_0 média da imagem, aproximadamente.

4.4. Dados de Leixões e do SNIRH

Nesta subsecção, apresentam-se dados observados pela boia ondógrafo de Leixões, do Instituto Hidrográfico, relativamente a parâmetros de agitação marítima e dados, disponibilizados no *site* do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) relativamente a parâmetros de vento. Os dados de agitação marítima servem vários propósitos nomeadamente: (i) de comparação dos valores calculados de λ_0 ao largo (ver capítulo anterior) com os valores observados; (ii) determinação da batimetria (h), sabendo o comprimento de onda para águas profundas (λ_0) calculado através do período de pico (T_p) medido pela boia de Leixões, a partir da Equação (3). Os dados de vento podem ser relevantes para investigar as condições atmosféricas no dia de cada imagem de forma a compreender e justificar determinados comportamentos. O vento é um parâmetro importante, uma vez que cria tensão sobre a superfície oceânica, deformando as características da onda, e gera vagas de menor comprimento de onda, podendo, desta forma, ser uma fonte de “ruído” na análise das imagens.

A boia ondógrafo direcional de Leixões do Instituto Hidrográfico (IH) encontra-se a uma profundidade de 83 metros e a sua localização é 41° 19' 00" N; 8° 59' 00" W. Esta boia possui sensores que efetuam medições da aceleração vertical do movimento da superfície livre do mar, permitindo obter informação acerca da altura e do período das ondas, da direção de propagação e da temperatura da água à superfície. A maioria dos dados disponíveis são apresentados de 3 em 3 horas; exceto nos dias em que as condições meteorológicas o justifiquem ou sejam adversas, os dados passam a ser menos espaçados. Neste caso concreto, o período temporal de interesse é de janeiro a março de 2015. Para os dias 18 de janeiro (imagem 6b42) e 23 de fevereiro (imagem 19a7), a informação é apresentada de três em três horas, até às 18h00, e de trinta em trinta minutos, a partir desta hora. No dia 30 de janeiro (imagem 07c8) todos os dados são de meia em meia hora. Nos dias 17 de fevereiro (imagem 178a), 1 de março (imagem 01d0) e 13 de março (imagem 2ece), os valores são de 3 em 3 horas. Foram considerados os seguintes parâmetros: a altura significativa da onda (H_s), em metros, que é à média do terço mais elevado das alturas de onda que foram registadas durante o período de observação; o período de pico (T_p), em segundos, que é período correspondente à banda de frequência com máximo valor de densidade espectral, sendo representativo das ondas mais energéticas presentes no registo (IH); a direção da propagação da onda, referente ao norte geográfico, parâmetro este que serviu como meio de validação na análise dos rumos obtidos pelo algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*.

A base de dados do SNIRH inclui uma rede de monitorização de informação meteorológica composta por 791 estações. No *site* que disponibiliza esta informação, é possível selecionar as estações de interesse, os parâmetros e o período de análise, bem como informação sobre as estações e os parâmetros. Os dados podem ser guardados nos formatos ‘.pdf’, ‘.CVS’ ou ‘.TSV’. A proximidade da zona em estudo foi o critério utilizado para selecionar as estações *Praia de Mira*, *Gafanha da Nazaré*, *Oliveira do*

Bairro, Albergaria-a-Velha, Bouçã, Ribeiradio, Espargo (Feira), Barragem de Castelo Burgães e Estrada. Os parâmetros solicitados foram a velocidade do vento horária, do vento instantâneo e do vento médio diária (em metros por segundo), para um período de análise de 17 de janeiro a 14 de março de 2015. Apenas as duas últimas estações possuíam dados da velocidade do vento horária para o período referido, em que a estação *Estrada* fornece informação apenas para as imagens *6b42* e *07c8*. A estação *Barragem de Castelo Burgães* tem uma altitude de 306 metros e a sua localização é 40.853°N e 8.379°W. A estação *Estrada* tem 45 metros de altitude e a sua localização é 40.465°N e 8.642°W, encontrando-se mais próxima da zona de estudo. Ambas se inserem na bacia do Vouga/Ribeiras Costeiras, pertencem ao distrito de Aveiro e a entidade responsável automática é a Autoridade Nacional da Água.

A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros H_s , T_p , λ_o , o comprimento de onda médio estimado na imagem (λ_{o_medImg}) e a velocidade do vento (V) para cada caso. Analisaram-se, para os parâmetros H_s e T_p , os valores mínimos, médios e máximos ao longo de cada dia e na hora de aquisição da imagem ($Hora_{aq}$). Os valores de H_s e T_p correspondentes à $Hora_{aq}$ referem-se à hora dos dados disponíveis mais próxima da hora de aquisição da imagem, em que $Hora_{aq1}$ e $Hora_{aq2}$ correspondem às horas imediatamente antecedente e imediatamente posterior à hora de aquisição, respetivamente. Por exemplo, na imagem *07c8*, a $Hora_{aq1}$ corresponde às 06h30, e a $Hora_{aq2}$ refere-se às 07h00. Os valores de λ_o são calculados a partir da Equação (3) que considera o T_p . A sétima coluna representa a diferença entre o λ_{o_medImg} e os λ_o para cada imagem [$\lambda_{o_medImg} - \lambda_o$]. Na oitava coluna, os valores da velocidade do vento (mínimo, médio e máximo) adquiridos pela estação *Barragem de Castelo Burgães* estão assinalados com a letra *B*, e a estação *Estrada* identifica-se pela vogal *E*. Não se considerou V na hora da aquisição, ou próxima desta, porque não tem interesse prático.

O processamento da imagem *6b42* cessou ao obter os resultados do algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*, no entanto, nesta análise consideraram-se os H_s , T_p , λ_o mínimos, médios, máximos e numa hora próxima à de aquisição e a velocidade do vento para investigar se as condições atmosféricas naquele dia justificam os resultados obtidos.

Tabela 8 - Dados da boia de Leixões e do SNIRH para cada imagem

<i>Imagem</i>	<i>Data e hora de aquisição</i>	H_s (m)	T_p (seg)	λ_0 (m)	λ_{0_medImg} (m)	$\lambda_{0_medImg} - \lambda_0$ (m)	V (m/s)	
6b42	18-jan-2015 06h42min						B	E
		Mínimo: 2,86	8,00	99,92	--	--	0,00	0,50
		Médio: 3,84	10,57	174,43	--	--	1,60	2,26
		Máximo: 4,86	12,50	243,95	--	--	3,60	5,20
		Hora _{aq} : 3,31	8,00	99,92	--	--	--	--
07c8	30-jan-2015 06h42min						B	E
		Mínimo: 4,34	10,50	172,13	--	265	1,00	2,50
		Médio: 4,82	14,25	317,13	437,42	120	3,45	3,25
		Máximo: 5,48	16,70	435,43	--	2	8,50	4,50
		Hora _{aq1} : 4,79	15,40	370,28	--	67	--	--
		Hora _{aq2} : 4,61	16,70	435,43	--	2	--	--
178a	17-fev-2015 18h35min						B	
		Mínimo: 2,80	13,30	276,18	--	30	0,70	
		Médio: 3,47	14,05	308,21	306,12	-2	1,62	
		Máximo: 4,20	14,30	319,27	--	-13	3,40	
		Hora _{aq} : 2,97	13,30	276,18	--	30	--	
19a7	23-fev-2015 06h42min						B	
		Mínimo: 2,47	11,10	192,36	--	77	0,30	
		Médio: 3,39	11,75	215,78	269,19	53	1,97	
		Máximo: 4,27	12,50	243,95	--	25	4,30	
		Hora _{aq} : 2,84	11,10	192,36	--	77	--	
01d0	01-mar-2015 18h35min						B	
		Mínimo: 2,52	11,80	217,39	--	154	0,40	
		Médio: 2,96	12,73	253,31	371,33	118	0,91	
		Máximo: 3,49	14,30	319,27	--	52	3,60	
		Hora _{aq} : 3,49	12,50	243,95	--	128	--	
2ece	13-mar-2015 18h35min						B	
		Mínimo: 2,05	10,50	172,13	--	111	0,00	
		Médio: 3,16	12,51	244,44	283,05	38	1,03	
		Máximo: 4,33	14,30	319,27	--	-36	3,60	
		Hora _{aq} : 4,12	13,30	276,18	--	7	--	

A classificação do vento, segundo o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), apresentada na Tabela 9, permite avaliar se os parâmetros medidos para os dias em questão se traduzem em condições adversas. Foram efetuadas aproximações, uma vez que a informação do IPMA é expressa em quilómetros por hora.

Tabela 9 - Classificação do vento

<i>Denominação da intensidade do vento</i>	<i>Velocidade do vento (m/s)</i>
<i>Fraco</i>	< 4,2
<i>Moderado</i>	4,2 a 9,7
<i>Forte</i>	10,0 a 15,3
<i>Muito forte</i>	15,6 a 20,8
<i>Excecionalmente forte</i>	> 20,8

Fonte: IPMA

A análise da informação das Tabelas 8 e 9 permite efetuar diversas constatações. Em qualquer dos casos o vento tinha uma intensidade fraca exceto para a imagem *6b42*, em que se verificou uma intensidade moderada. A imagem *6b42* foi adquirida às 6h42min, no dia 18 de janeiro (regime de inverno) quando a altura significativa das ondas era de 3,31 metros e o período de pico de 8 segundos. A velocidade máxima do vento medida naquele dia atingiu os 5,20m/s, considerado um vento moderado, o que poderá ter criado perturbações na superfície do mar, perceptível na imagem aquando do processamento pelo algoritmo *CalcWavelengthGrid.m*. Os valores dos parâmetros da imagem *07c8*, medidos no dia 30 de janeiro (regime de inverno) são típicos de um período de temporal com H_s elevados, sendo o mínimo de 4,34m, o máximo de 5,48m e os dados próximos da hora da aquisição (sendo *hora_{aq1}* às 06h30 e *hora_{aq2}* às 07h00) contidos neste intervalo de valores. O T_p apresenta valores elevados, atingindo um mínimo de 10,50 segundos e um máximo equivalente a uma hora próxima da aquisição de 16,70 segundos, o que se traduz em condições favoráveis de *swell*. Consequentemente, o comprimento de onda para águas profundas (λ_o) é também elevado, atingindo o máximo de 435,43m numa das horas próximas à aquisição da imagem. A velocidade do vento medido na estação *Estrada* apresenta uma certa consistência na variabilidade dos valores (desde 2,50 a 4,50 m/s) ao longo do dia. Este facto pode explicar a maioria dos índices de qualidade referentes à matriz λ , obtidos pela rotina *CalcWavelengthGrid.m*, serem excelentes. Na imagem *178a*, de 17 de fevereiro, a H_s na hora próxima à aquisição (18h00) é de 2,97 metros, próxima da mínima de 2,80 metros, enquanto a máxima atingida é de 4,20 metros. Os T_p medidos são elevados e variam entre o mínimo de 13,30 e o máximo de 14,30 segundos. O vento é fraco ao longo do dia, tendo apresentado um máximo de 3,40 m/s e chegando a haver ausência de vento. A imagem *19a7*, de 23 de fevereiro, apresenta um H_s na hora próxima à aquisição (06h00) de 2,84 m e um H_s máximo de 4,27 m. O período de pico observado na hora da aquisição é mínimo e atinge os 11,10 segundos, enquanto o máximo é de 12,50 segundos. O λ_o é mínimo aquando de uma hora próxima à aquisição

da imagem apresentado o valor de 192,36 metros. O vento mínimo atingiu os 0,3m/s, sendo fraco. Para a imagem *01d0*, do dia 1 de março, a altura significativa é máxima numa hora próxima à aquisição (18h00), sendo de 3,49 metros. O T_p máximo é de 14,30 segundos, correspondendo a um λ_o máximo de 319,27 metros, enquanto, na hora próxima da aquisição, o T_p é de 12,50 segundos, referente a um λ_o de 243,95 metros. O vento é, em geral, fraco e apresenta o máximo de 3,6m/s. A imagem *2ece*, de 13 de março, apresenta um H_s mínimo de 2,05 metros e um máximo de 4,33 metros. Na hora próxima à aquisição (19h00) a altura significativa é de 4,12 metros e o período de pico é de 31,30, correspondendo a um λ_o de 279,18 metros. O vento, ao longo do dia, é considerado fraco, chegando a haver ausência de vento.

Ao comparar os parâmetros das seis imagens, verifica-se que todas apresentam condições que implicam a existência de *swell* pelos períodos de pico superiores a 8 segundos. Contudo, no dia da imagem *07c8* as condições eram adversas e os valores de H_s , T_p (superior a 8 e próximo de 20 segundos) e λ_o são os mais elevados, sendo significativos de *swell* bem definido.

Comparando os valores de λ_o médio estimados nas imagens com os λ_o relativos aos T_p máximo (T_{pmax}), mínimo (T_{pmin}) e médio ($T_{pméd}$) medidos pela boia ondógrafo, constata-se que o λ_o mais próximo do estimado pela imagem é, de um modo geral, o calculado a partir do T_{pmax} , com exceção de dois casos em que o menos distante é o que considera o T_p numa hora próxima à aquisição da imagem. Em todos os casos, o λ_o correspondente ao T_{pmin} é muito inferior ao λ_{o_medImg} . Verificou-se, ainda, que o λ_{o_medImg} na *178a* coincide com o λ_o médio relativo ao medido pela boia ondógrafo. Para as imagens *07c8* e *01d0*, estes dois parâmetros diferem em $\sim 120m$. No caso da imagem *19a7*, o λ_{o_medImg} distancia-se em 53m do λ_o relativo ao $T_{pméd}$ medido pela boia, enquanto para a imagem *2ece*, estes diferem em 38m.

4.5. Determinação da Batimetria

A batimetria foi estimada para uma zona mais ao largo e para uma área junto à zona costeira, i.e., para as regiões das imagens apresentadas na parte I deste Capítulo 4, e comparada com os dados batimétricos disponibilizados *online* pelo Instituto Hidrográfico (IH) cuja resolução espacial é de 2 milhas (cerca de 3700m).

A profundidade (h) é expressa em metros e determinada a partir da Equação (5) que, por sua vez, considera: a matriz λ calculada pelo algoritmo *CalcWavelengthGrid.m* para cada subimagem (domínios ao largo e junto à costa), descrito no Capítulo 3; o comprimento de onda para águas profundas (λ_o) obtido através da Equação (3), que considera o período de pico T_p (obtendo, então, o λ_o mínimo, médio, máximo e, em alguns casos, numa hora próxima à aquisição); o λ_o médio estimado diretamente em cada subimagem ao largo. A Figura 18 apresenta a localização dos pontos h calculados

para a imagem 178a que apresenta o domínio mais ao largo. Exclui-se em cada caso os pontos para os quais o valor do índice de qualidade era igual a 0.

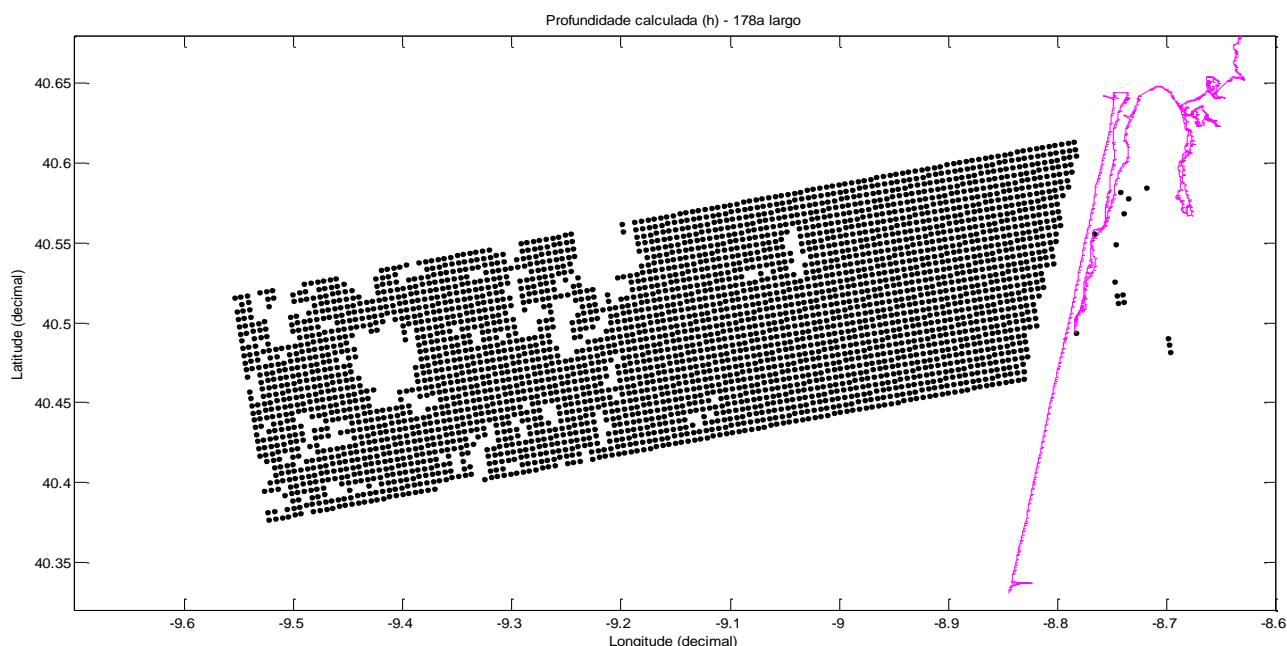


Figura 18 - Localização dos pontos com profundidade calculada (h) para a imagem 178a ao largo

Apresentam-se, de seguida e numa primeira fase, gráficos da batimetria calculada pelo método descrito e a observada pelo IH obtidos na aplicação de testes de sensibilidade à dimensão da célula. Numa segunda fase, procede-se aos testes de sensibilidade aos valores de λ_0 . Estas análises permitem investigar quais os parâmetros que melhor se adequam ao método em estudo, para as cinco imagens 178a, 01d0, 2ece, 07c8 e 19a7. Nessas figuras (por exemplo a Figura 19), a batimetria observada pelo IH corresponde às isolinhas verticais quase paralelas à costa, marcadas de 10m a 100m e espaçadas de 5m. Os pontos onde existe informação batimétrica do Instituto são marcados a rosa. Salienta-se que as isolinhas do IH são traçadas em função da informação disponível referente aos pontos cor-de-rosa, que são os dados batimétricos observados pelo IH. Verifica-se que estes valores são bastante alisados, ou seja, toda a informação que se encontra a uma menor distância entre dois pontos rosa não é traçado ao pormenor. Relativamente aos valores batimétricos calculados pelo método, estes fornecem informação mais detalhada por o número de dados não ser tão limitado como os do IH. A linha de costa abrangida pelo setor em estudo é assinalada a preto (ou a rosa, nos casos em que seja necessária uma melhor distinção dos vários elementos representados), e engloba a embocadura da laguna de Aveiro a norte e traça o canal de Mira que acompanha paralelamente o setor em estudo.

4.5.1. Testes de sensibilidade à dimensão da célula

No presente subcapítulo, efetuam-se testes de sensibilidade à dimensão da célula cujos valores testados são 4km (no domínio mais ao largo) e 1km, 2km e 2,5km (no domínio junto à costa).

Subimagem 178a - Domínio ao largo

A Figura 19 representa a sobreposição das batimetrias calculada e observada da subimagem 178a ao largo, em que comprimento do lado da célula é de 4 km, o incremento é de 500 metros e o λ_0 máximo de Leixões é de ~319 metros.

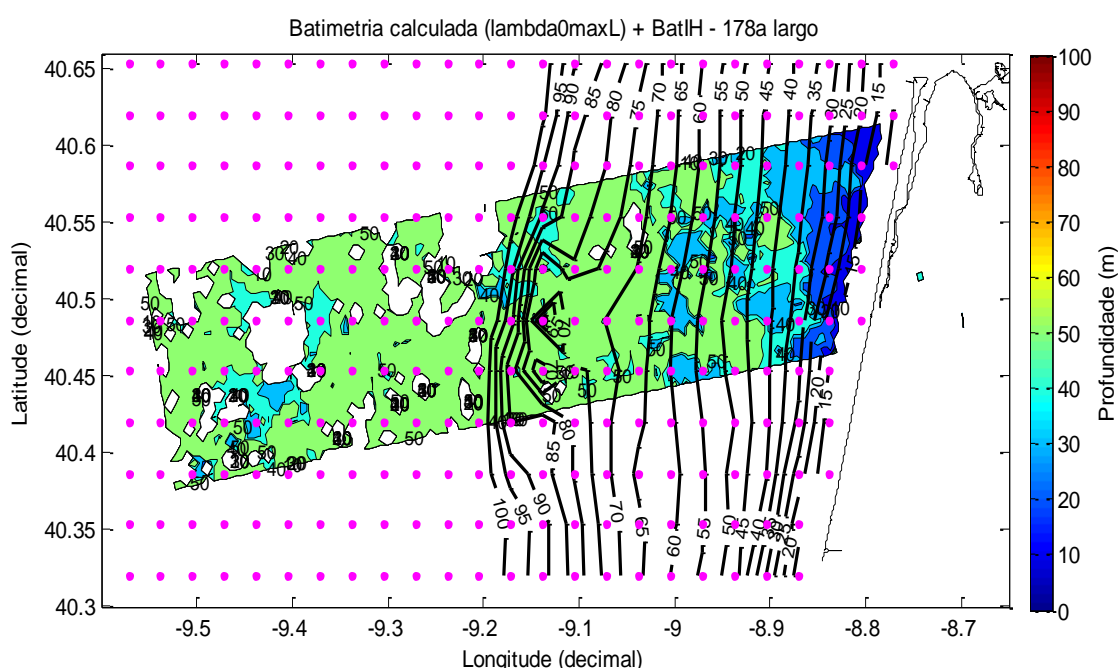


Figura 19 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a ao largo considerando 4km de lado da célula e λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a preto que abrange a embocadura da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais marcadas de 10 a 100 são as isolinhas batimétricas do IH

A batimetria calculada pelo método, para este caso, varia entre os 9 e os 248 metros, aproximadamente. No gráfico da Figura 19, as isolinhas calculadas são traçadas apenas até aos 50 metros para facilitar a análise da figura. Existe uma faixa mais próxima da zona costeira em que há perda de informação, uma vez que o tamanho da célula é demasiado grande, não sendo possível aproximá-lo mais da linha de costa. Estes resultados permitem evidenciar que se torna necessário considerar um domínio de imagem mais costeiro no qual se define uma célula de dimensão inferior. Para além destas profundidades, os resultados obtidos não são úteis, pois só existe ruído. A inexistência de dados ao longo da área em estudo deve-se a questões relacionadas com a expressão que calcula a profundidade h , que fornece valores imaginários quando os

valores de λ do setor são iguais ou superiores ao λ_0 , sendo substituídos por *NaN* (*not a number*). Este cálculo considera a tangente hiperbólica inversa cujo domínio varia no intervalo $[-1;1]$, razão pela qual, nas condições referidas, se obtêm números imaginários. A fim de melhor comparar a batimetria calculada com a do IH, aplica-se um *zoom* para este caso ilustrado em seguida.

A Figura 20 é um *zoom* da Figura 19 (para o λ_0 máximo de Leixões de ~ 319 metros). As isolinhas calculadas estão espaçadas de 10 metros. A batimétrica calculada dos 10 metros é paralela à costa e não coincide com a respectiva observada, apesar desta ser parcialmente traçada. As Figuras 19 e 20 mostram que o método aplicado não parece estimar corretamente os valores de h superiores a 30 m. Para as profundidades inferiores, as isolinhas calculadas dos 15, 20, 25 e 30 metros apresentam oscilações e desvios relativamente às isolinhas de referência da batimetria do IH.

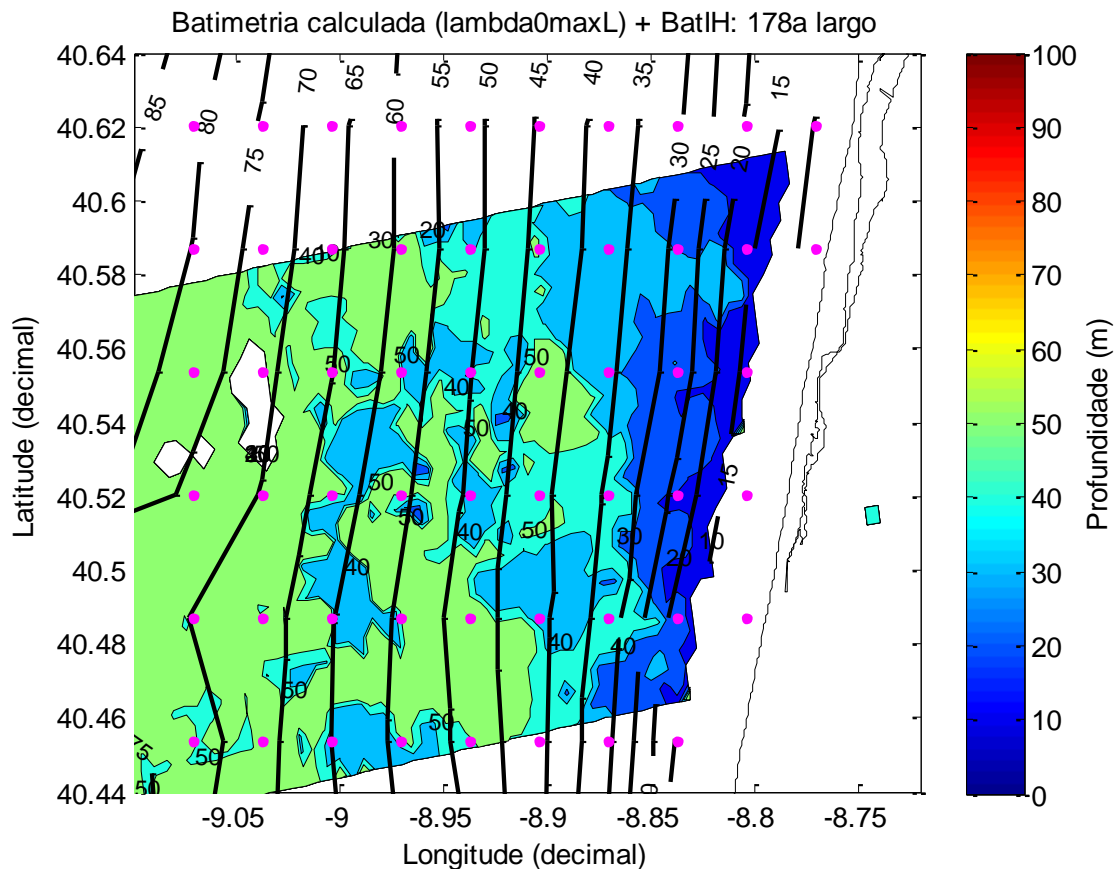


Figura 20 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a ao largo com *zoom*, considerando 4km de lado da célula e o λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a preto que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais marcadas de 10 a 85 são as isolinhas batimétricas do IH

Subimagem 178a - Domínio junto à costa

A Figura 21 ilustra a batimetria calculada em que considerou uma célula de 1 km de lado e o λ_0 máximo de Leixões. O intervalo de valores batimétricos calculados varia entre 1 e 9 metros, aproximadamente. Esta gama de valores está incorreta em comparação com a batimetria do IH, para além do padrão caótico visível numa primeira instância. A dimensão lateral de 1km não se adequa, portanto, ao método em estudo.

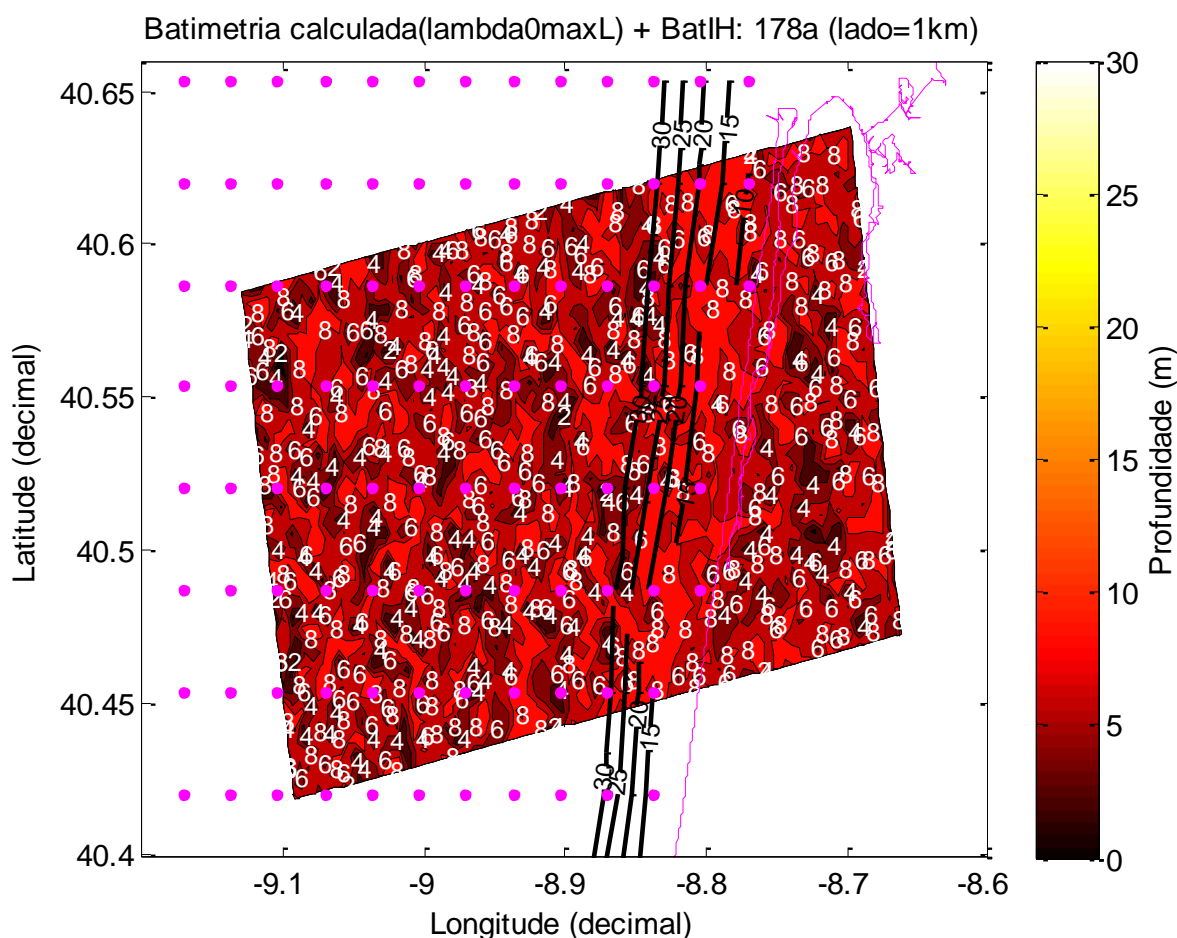


Figura 21 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 1km de lado e λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

A Figura 22 apresenta a batimetria calculada para a imagem 178a junto à costa, considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 máximo de Leixões. A batimetria varia entre os ~2 e os ~49 metros. Para uma análise mais detalhada e facilitada, aplica-se um *zoom* ao gráfico, apresentado na Figura 23.

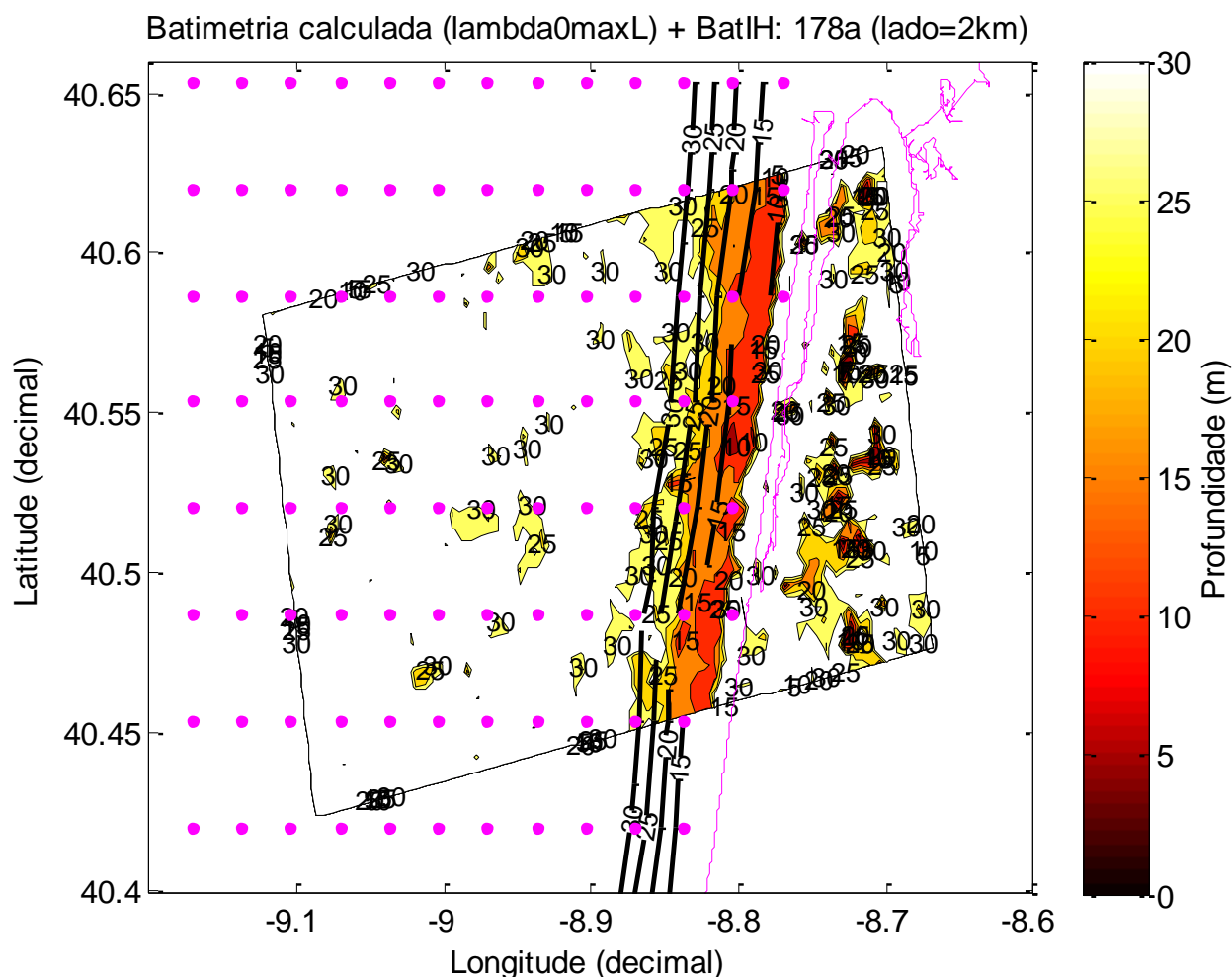


Figura 22 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 2km de lado e λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

A Figura 23 ilustra a batimetria calculada para a imagem 178a junto à costa (célula de 2km de lado; λ_0 máximo de Leixões), com um *zoom* aplicado. As isolinhas calculadas são espaçadas de 5 metros e traçadas até aos 30 metros.

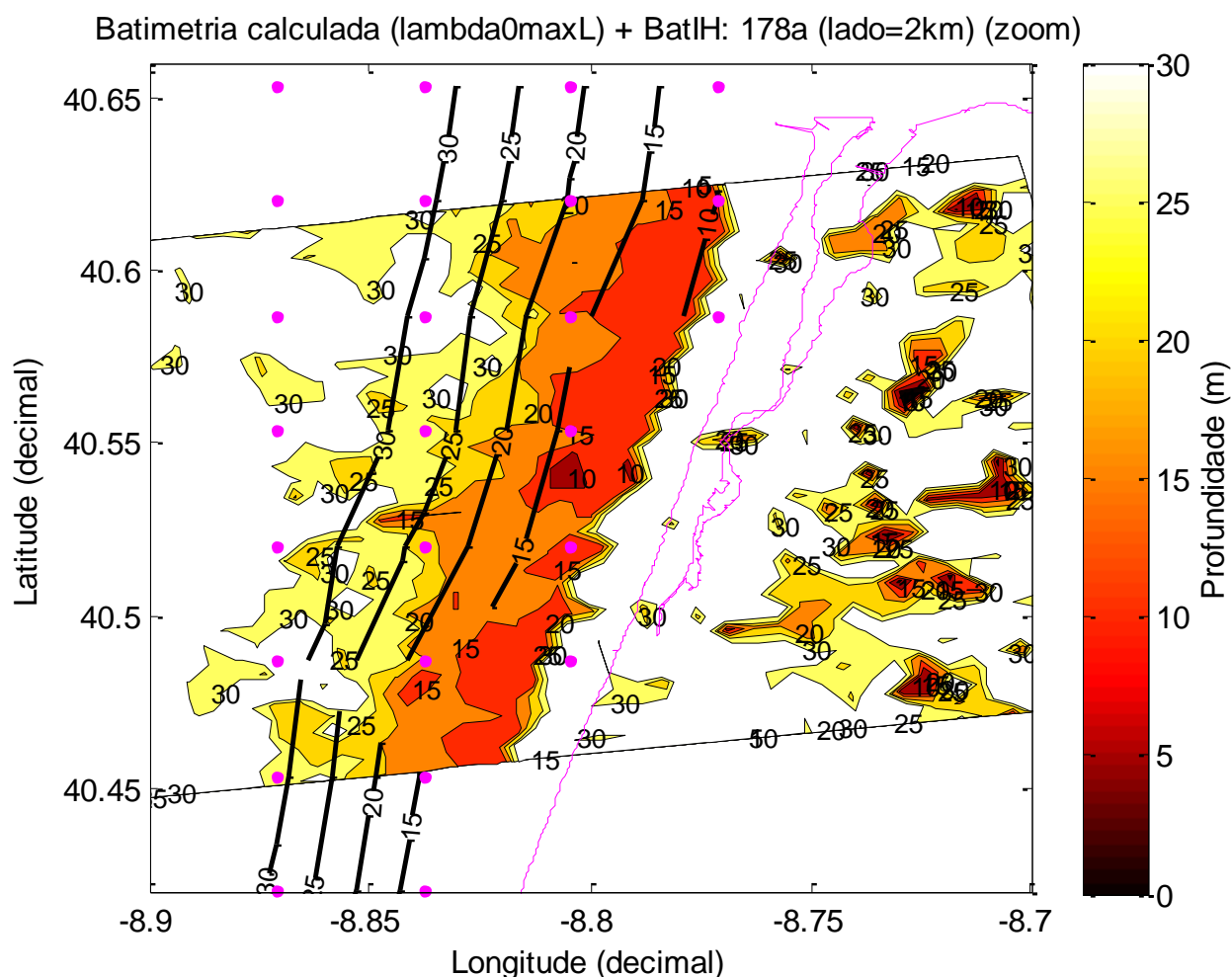


Figura 23 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa com zoom aplicado, considerando uma célula de 2km de lado e λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

Verifica-se que para os parâmetros aplicados no resultado da Figura 23, o método permite estimar profundidades h ao longo de toda a área retangular, havendo informação batimétrica junto à costa. A batimétrica calculada dos 10m não descreve uma linha contínua e paralela à costa, mas sim um ilhéu próximo de terra. As isolinhas calculadas dos 15-30m apresentam uma variação relativamente às do IH, com reentrâncias quer para a costa e para o largo. Esta variabilidade é mais acentuada para as isolinhas do 25 e 30m. Para além dos 30 metros de profundidade, a informação obtida pelo método contém ruído e não se verifica nenhum ajuste entre os dados calculados e os observados.

A Figura 24 apresenta a batimetria calculada para a imagem 178a junto à costa, em que se considera uma célula de 2,5km de lado e o λ_0 máximo de Leixões, com um *zoom* aplicado. As batimétricas calculadas são traçadas dos 10 aos 30 metros, sendo espaçadas de 5 metros.

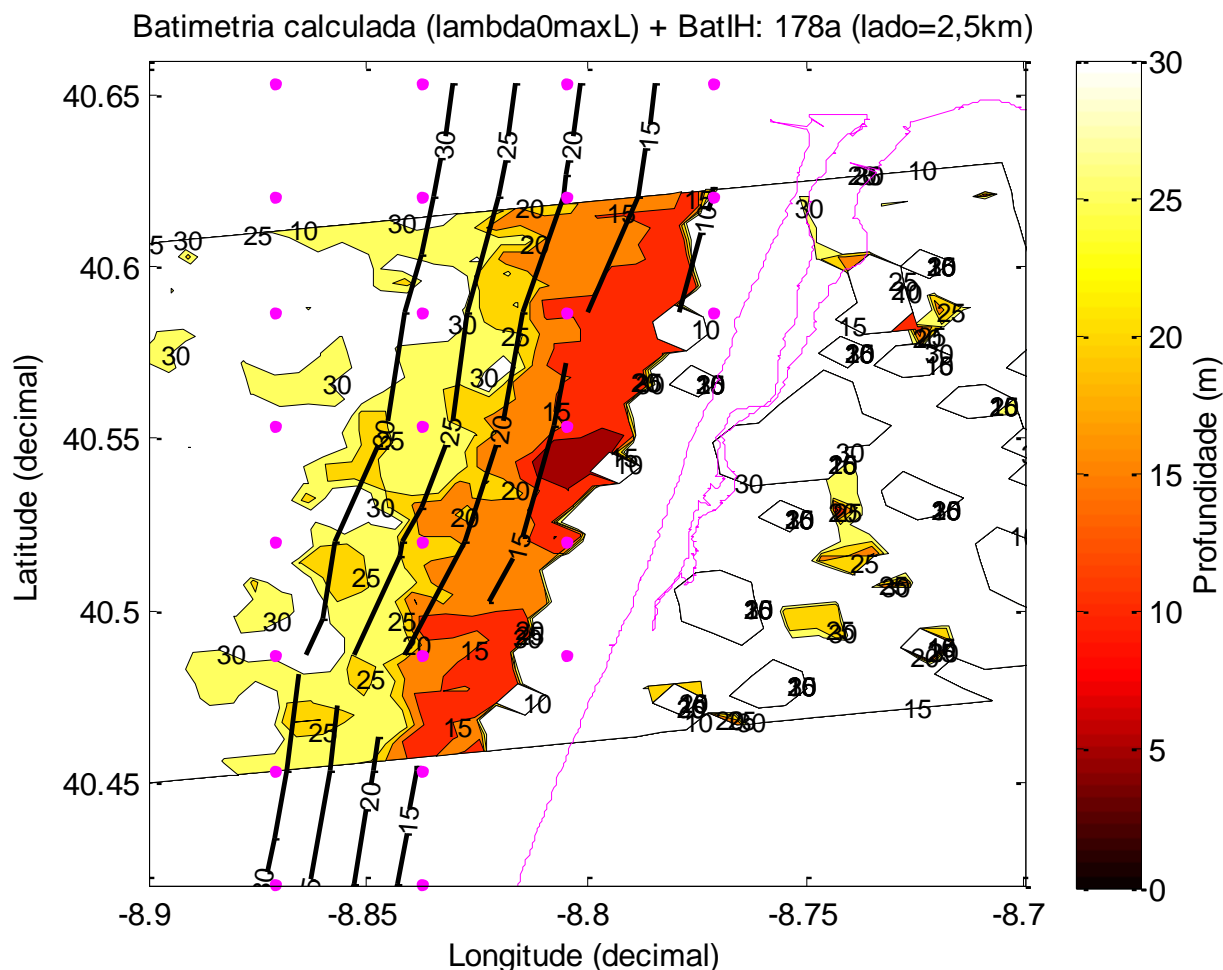


Figura 24 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa com zoom aplicado, considerando uma célula de 2km de lado e λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

Verifica-se que o resultado obtido para o λ_0 máximo e para a célula de 2,5 km de lado apresenta muitas semelhanças com a aplicação da célula de 2km de lado (ver Figura 23). O comportamento das batimétricas calculadas não difere substancialmente, salientando a existência comum de uma reentrância destacada (em direção ao largo) da isolinha dos 20m e uma descontinuidade do traçado da isolinha dos 15m (parte inferior). A principal distinção entre as Figuras 23 e 24 reside numa aproximação maior à costa ao aplicar a célula de 2km face à de 2,5km de lado.

Constata-se que, nos resultados para o domínio mais ao largo, o grau de aproximação à costa perde-se por a distância ser considerável. A dimensão da célula de 4km não favorece a discriminação das isolinhas mais próximas à costa (entre os 10 e os 30m de profundidade). Relativamente aos resultados do domínio junto à costa, observou-se que a aplicação dos comprimentos da célula de 2 e 2,5km de lado permite uma maior aproximação à costa, sobretudo no caso dos 2km, e os resultados são muito semelhantes entre si. Conclui-se que o uso da dimensão lateral de 2km é o valor que mais se adequa ao método.

4.5.2. Testes de sensibilidade ao valor do λ_0

Na presente subsecção, pretende-se testar a sensibilidade ao valor de λ_0 , pelo que são apresentados os resultados para as subimagens de *178a* e *07c8* junto à costa para diferentes λ_0 , fixando o valor do comprimento lateral da célula, i.e., 2km de lado, para todos os casos. A escolha destas duas imagens deve-se ao facto de a primeira apresentar uma variabilidade reduzida nos valores de λ_0 , enquanto no caso da *07c8* a gama dos valores de λ_0 é elevada, decorrente da grande variação do período da onda no dia da aquisição da imagem (ver Tabela 8, página 41). O resultado da aplicação do λ_0 máximo para a imagem *178a* não é apresentada neste subcapítulo, uma vez que aparece na secção anterior.

Subimagem 178a

A Figura 25 exibe a batimetria calculada para a imagem 178a junto à costa em que se considera o λ_0 médio de Leixões de $\sim 308\text{m}$. A batimetria calculada, para este caso, varia no intervalo de valores dos 2 aos 53 metros, aproximadamente. A isolinha calculada dos 10m descreve uma ilha, não sendo concordante com a respetiva do IH. A isolinha calculada dos 15m oscila em torno da observada, principalmente na parte superior, afastando-se da mesma na parte central sul. Toda a linha batimétrica calculada dos 20 metros circunda a observada correspondente, com uns pequenos desvios pontuais em dois locais em que intersesta as batimétricas dos 15 e dos 25 metros do IH. As isolinhas calculadas dos 25 e 30 metros são as que mais se afastam das observadas. O valor do λ_0 médio de Leixões ($\sim 308\text{m}$) é coincidente com o λ_0 médio estimado na imagem ($\sim 306\text{m}$) e, conseqüentemente, os resultados vão ser iguais. Assim sendo, apenas se apresenta este resultado referente λ_0 médio de Leixões.

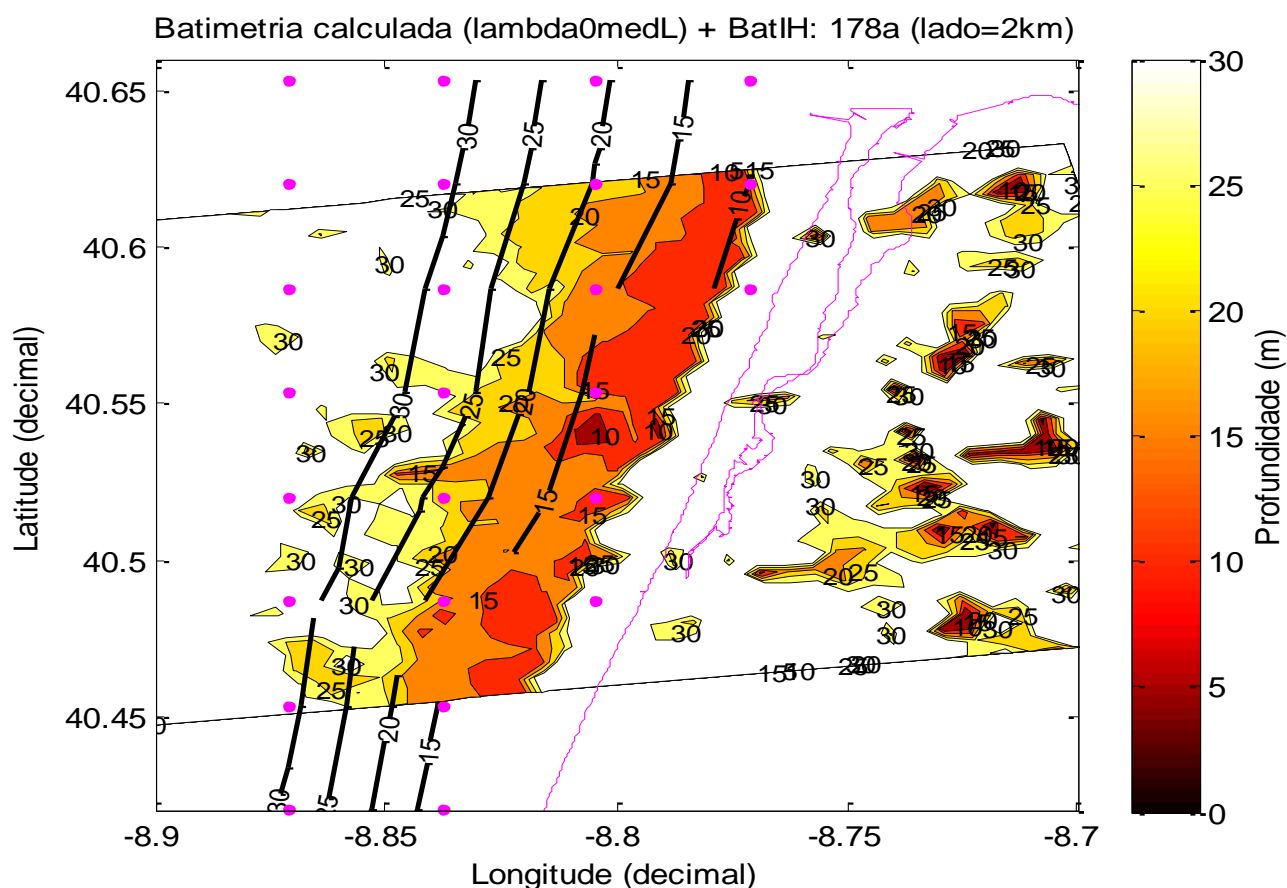


Figura 25 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 2km de lado e o λ_0 médio de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

A Figura 26 expõe a batimetria calculada para a imagem 178a junto à costa considerando uma célula de 2 km de lado e valor λ_0 mínimo de Leixões (~276m). A batimetria varia entre os 2 e os 77 metros, aproximadamente. De um modo geral, as batimétricas calculadas dos 15 aos 30 metros têm bastante curvas e não coincidem com as observadas respectivas, apresentando um desvio associado. O valor de λ_0 mínimo de Leixões é igual ao λ_0 medido na hora da aquisição da imagem, pelo que apenas se apresenta este resultado para o λ_0 mínimo.

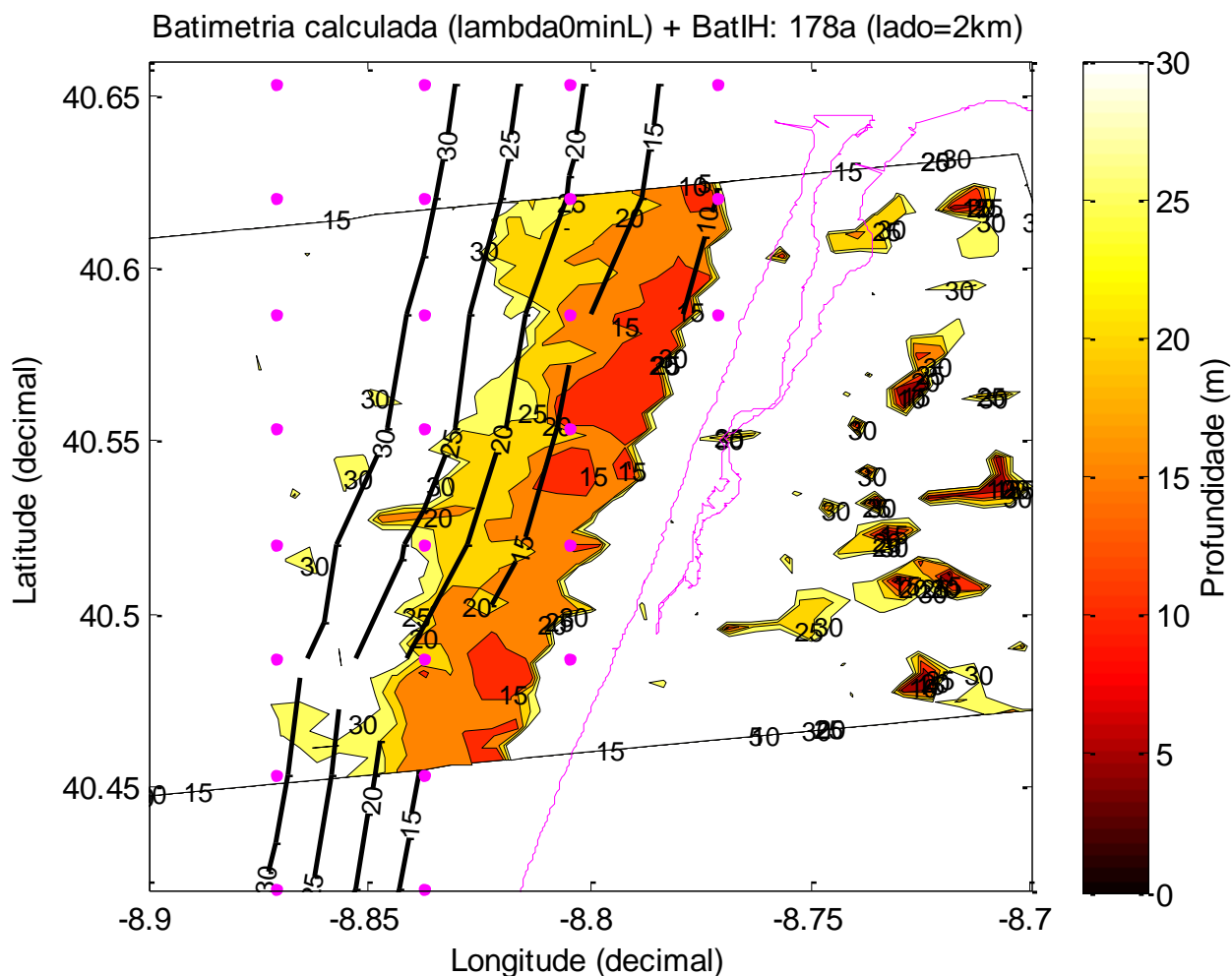


Figura 26 - Batimetria calculada e observada para a imagem 178a junto à costa, considerando uma célula de 2km de lado e o λ_0 mínimo de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

Em síntese, no processamento da subimagem 178a junto à costa, ao analisar os resultados obtidos para os diferentes λ_0 mínimo (λ_{0_minL}), médio (λ_{0_medL}) e máximo (λ_{0_maxL}), (sendo este último apresentado na subsecção 4.5.1 – *Domínio junto à costa* – do presente Capítulo), obtém-se um melhor ajuste entre os dados batimétricos calculados e os observados, considerando o λ_0 médio de Leixões. De salientar que o λ_{0_medL} (~308m) e o λ_0 médio estimado na imagem (λ_{0_medImg}) (~306m) são praticamente coincidentes e, por conseguinte, os resultados são iguais. O λ_{0_minL} (~276m) é o que apresenta pior ajuste, provavelmente por se distanciar mais do λ_{0_medImg} , em 30m.

A análise dos dados dos parâmetros de agitação marítima medidos por Leixões permite verificar que o H_s máximo para aquele dia (17 de fevereiro de 2015) foi de 4,20m e o mínimo foi de 2,80m, enquanto na hora de aquisição foi de 2,97m, muito próximo do mínimo. A gama de T_p apresenta uma variabilidade reduzida: o mínimo foi de 13,30s, o médio foi de 14,05s e o máximo foi de 14,30s. Por conseguinte, a variabilidades dos valores de λ_0 também é reduzida, sendo que a diferença entre o λ_{0_medImg} para os restantes λ_0 é a seguinte: para o λ_{0_minL} é de 30m, para o λ_{0_medL} é de 2m, para o λ_{0_maxL} é de 13m e para o λ_{0_aquisL} (comprimento de onda da hora da aquisição) é de 30m (por ser igual ao λ_{0_minL}). O vento na estação *Barragem de Castelo Burgães* era vento fraco, ao longo de todo o dia, atingindo um máximo de 3,40m/s.

Subimagem 07c8

A Figura 27 apresenta a batimetria calculada para a subimagem 07c8 para o λ_0 máximo de Leixões de ~435 metros. Os valores de profundidade, h , variam entre os 2 e os 29 metros, aproximadamente. Relativamente à imagem 178a (e 01d0 e 2ece), esta apresenta uma orientação diferente, abrangendo a zona mais a norte do setor praia de Mira-Aveiro, contudo, a área próxima à zona costeira não difere do caso anterior. A batimétrica estimada dos 10m ilustra pequenas ilhas próximas da costa. A isolinha calculada dos 15 metros (parte exterior) encontra-se ligeiramente afastada da linha de costa, apresentando muitas curvas e circunda a isolinha observada dos 10 metros, desviando-se da batimetria do IH. A batimétrica calculada dos 20 metros, descreve curvas em torno da batimétrica observada dos 15 metros. A isolinha dos 25 metros desvia-se bastante da observada, de tal forma que intersesta a dos 40 metros observada. O λ_0 máximo de Leixões e o λ_0 médio estimado na imagem (~437 metros) distanciam-se em apenas 2 metros, pelo que os resultados batimétricos são, consequentemente, iguais.

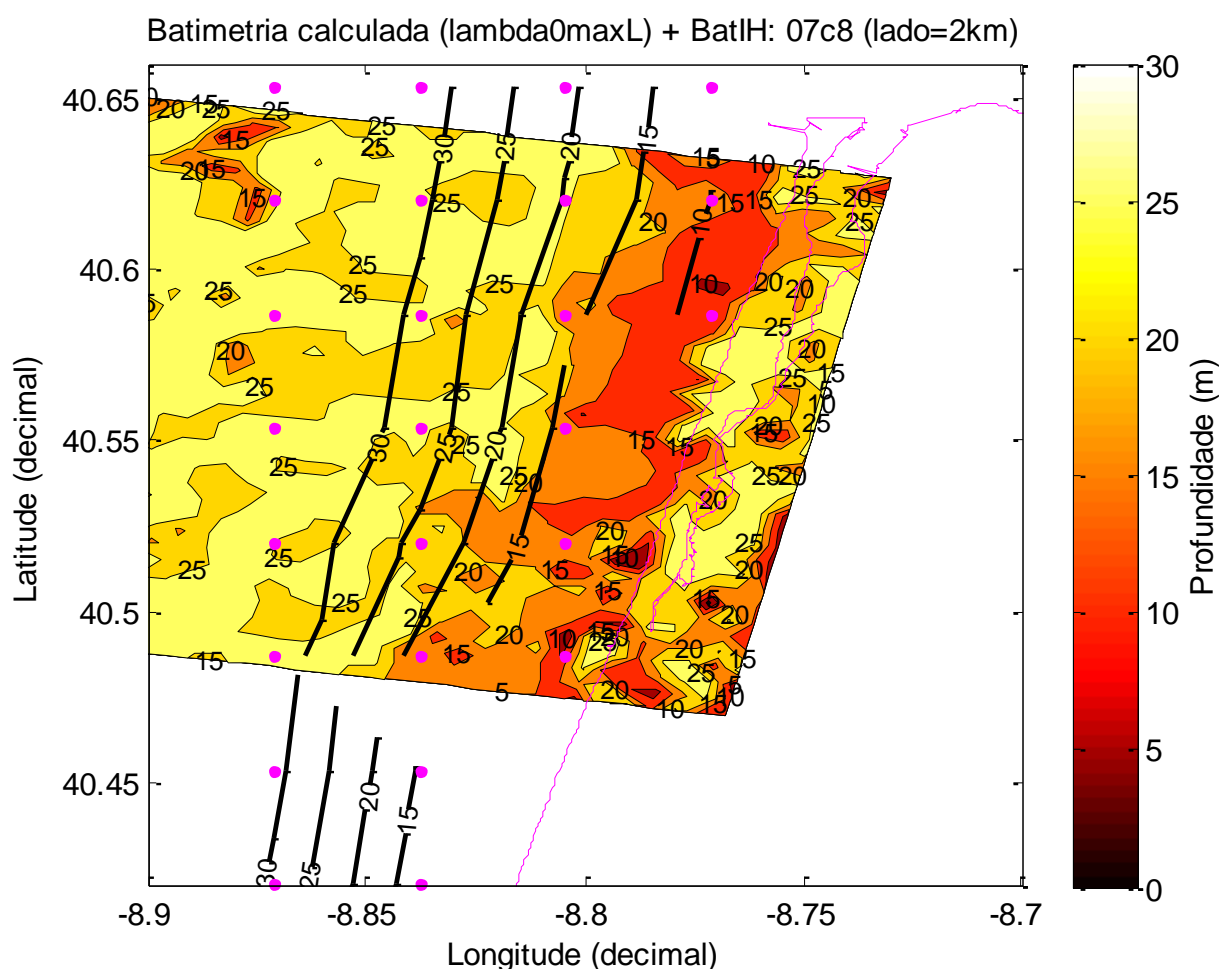


Figura 27 - Batimetrias calculada e observada para a imagem 07c8 junto à costa considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 máximo de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

A Figura 28 representa a batimetria calculada para a subimagem 07c8 para o λ_0 médio de Leixões de ~317m. Os valores de h variam entre os ~3 e os ~50 metros. O gráfico ilustra as batimétricas calculadas até aos 30 metros porque para além deste limite os dados têm ruído associado. A isolinha calculada dos 15 metros representa pequenos cumes ao longo da linha de costa, e afasta-se da observada. As batimétricas calculadas dos 20 aos 30 metros são próximas entre si, mas não se ajustam às respectivas do IH.

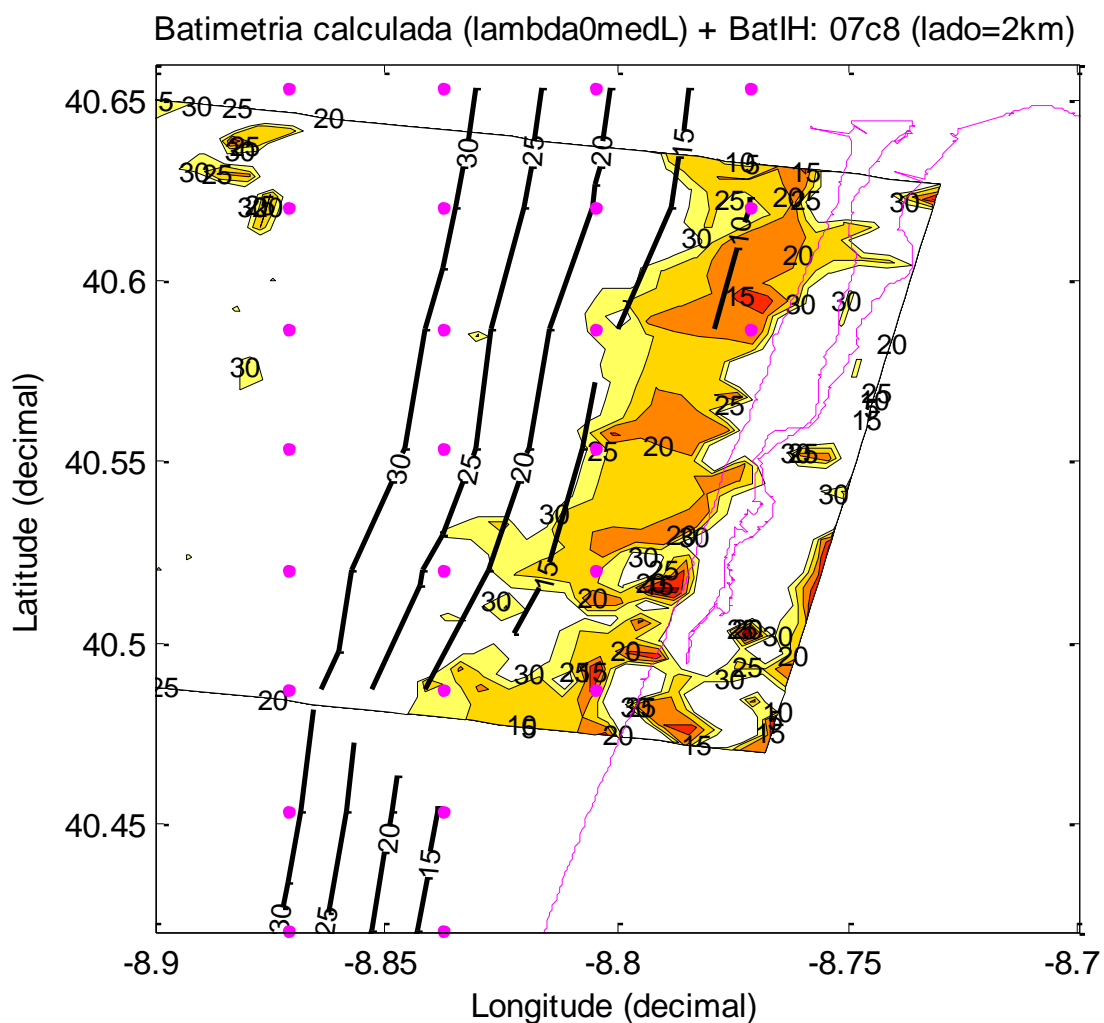


Figura 28 - Batimetrias calculada e observada para a imagem 07c8 junto à costa considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 médio de Leixões. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

No que diz respeito aos resultados referentes à aplicação do λ_0 mínimo de Leixões de ~172 metros, o método não calcula profundidades h , devolvendo NaN.

A Figura 29 exibe a batimetria calculada para a subimagem 07c8 para o λ_0 a uma hora próxima à aquisição da imagem de $\sim 370\text{m}$, às 6h30min, tendo em conta que a aquisição foi às 6h42min. A profundidade estimada pelo método varia entre os 3 e os 37 metros, aproximadamente. A isolinha dos 15 metros descreve vários cumes próximos da costa e ao longo de toda a área retangular, afastando-se da observada. As batimétricas dos 20 aos 30 metros são sinuosas e não coincidem com as respetivas observadas, estando localizadas mais próximo de terra.

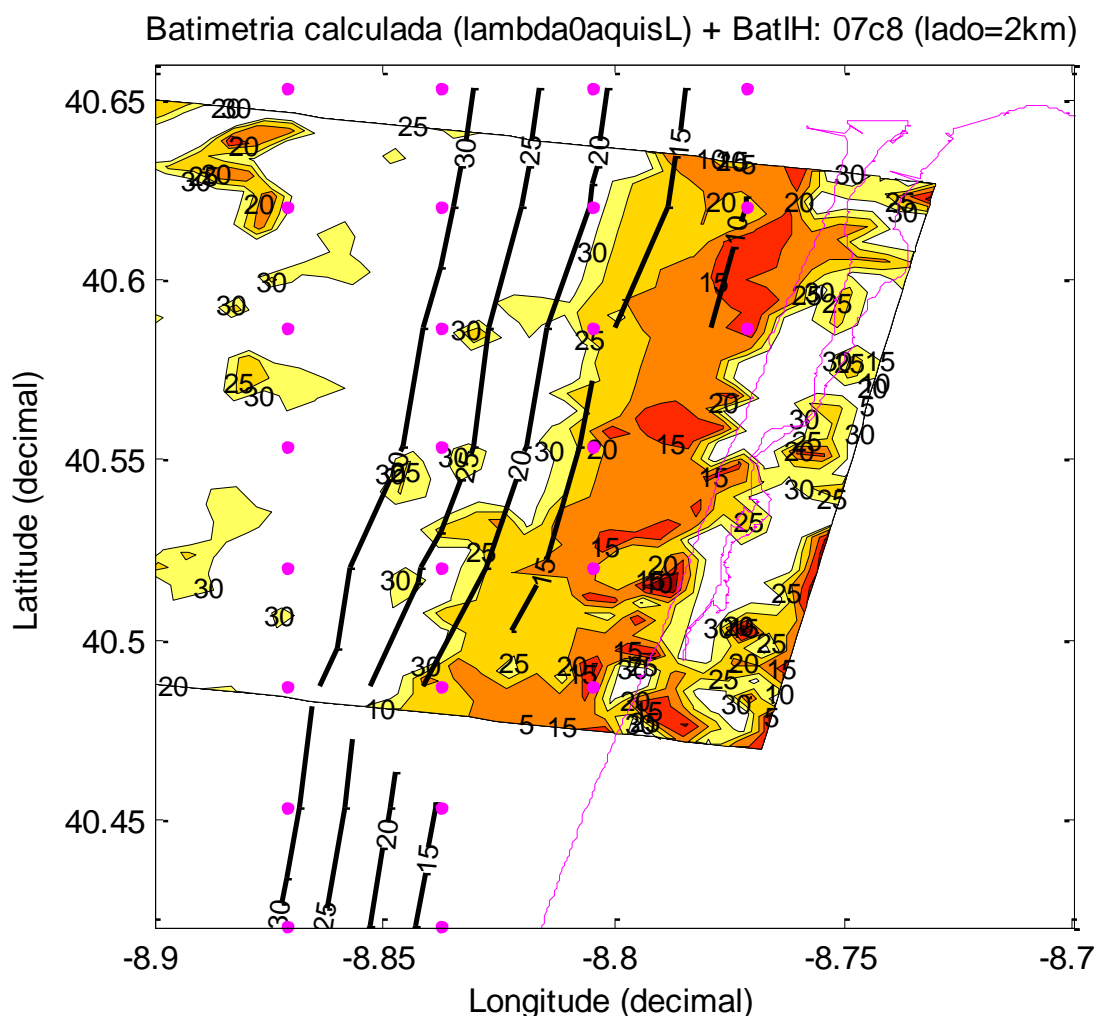


Figura 29 - Batimetrias calculada e observada para a imagem 07c8 junto à costa considerando a célula de 2km de lado e o λ_0 numa hora próxima à aquisição da imagem. Legenda: linha de costa a rosa que abrange um braço da laguna de Aveiro; pontos rosa são os dados batimétricos do IH; linhas horizontais a preto marcadas de 10 a 30 são as isolinhas batimétricas do IH

Considerou-se, ainda, um λ_0 próximo da hora de aquisição da imagem de ~ 435 metros, que corresponde ao T_p medido pela boia de Leixões às 07h00. Este valor coincide com o λ_0 máximo e, como tal, os resultados de ambos são iguais.

Em síntese, a batimetria calculada através da imagem *07c8* não se ajusta adequadamente à observada. Verificou-se um recuo no traçado das isolinhas obtidas pelo método face às do IH, na maioria dos casos. No entanto, quando se considera o λ_0 máximo de Leixões (~435m) os resultados apresentam uma melhor concordância face à aplicação dos restantes λ_0 . Note-se que o λ_{0_maxL} coincide com o λ_{0_medImg} , afastando-se apenas em 2m. A aplicação do λ_0 mínimo (~317m), apesar de não apresentados neste trabalho, não forneceu valores de profundidade, sendo o pior caso.

Os valores de λ_0 para esta imagem são elevados (e maiores que os das restantes imagens) e apresentam uma grande variabilidade: o λ_{0_medL} afasta-se 120m do λ_{0_medImg} , o λ_{0_minL} difere do λ_{0_medImg} em 256m e o λ_0 próximo da hora de aquisição da imagem distancia-se em 67m do λ_{0_medImg} . Verifica-se que, devido à elevada variabilidade destes valores, os resultados para esta imagem apresentam diferenças mais evidentes entre si (do que quando se comparam os resultados obtidos para a imagem *178a*), apesar de se observar um padrão comum na aplicação dos λ_0 para a imagem *07c8*.

Ao examinar a Tabela 8 (página 41), percebe-se que no dia em que a imagem foi adquirida (30 de janeiro de 2015), as condições meteorológicas e de agitação marítima eram típicas de um dia de temporal de inverno. Os valores máximos detetados para aquele dia foram os seguintes: H_s atingiu os 5,48 metros, T_p foi de 16,70 segundos que corresponde a um λ_0 máximo de ~435 metros e a velocidade do vento foi de 8,50 m/s na estação *Barragem de Castelo Burgães* e de 4,50 m/s na estação *Estrada*, considerado um vento moderado. As condições típicas de temporal poderão estar na origem da obtenção de resultados pouco satisfatórios.

O máximo de H_s é um valor consideravelmente elevado (sendo o maior de todas as imagens analisadas ao longo deste estudo), o que poderá explicar o facto da aplicação do λ_{0_maxL} ser o parâmetro mais adequado, neste caso, uma vez que, quanto maior a altura da onda, mais evidentes são as cavas e as cristas. Assim sendo, o sinal espacial é mais claro aquando do processamento pelo algoritmo da FFT.

Após testar o método para os vários valores de λ_0 , para as imagens *178a* e *07c8*, conclui-se que o λ_0 estimado a partir dos dados da boia ondógrafo de Leixões que fornece os melhores resultados de ajuste entre a informação calculada e a observada é o que mais se aproxima do valor de λ_{0_medImg} . Verificou-se que os valores de λ_{0_medL} e de λ_{0_maxL} forneceram resultados mais satisfatórios para a primeira e segunda imagem, respetivamente, por coincidirem com os λ_{0_medImg} correspondentes.

4.5.3. Testes de repetibilidade do método

Os resultados exibidos nesta secção e ilustrados na Figura 30, são os que conduziram ao ajuste mais adequado entre a batimetria calculada pelo método e a do IH para cada uma das cinco imagens analisadas. Para a imagem 178a o melhor ajuste verifica-se aquando da implementação do λ_{0_medL} (igual ao λ_{0_medImg}) e o comprimento lateral da célula de 2km; para as imagens 2ece e na 01d0 considera-se λ_{0_maxL} , respetivos, e a célula de 2km de lado; para as imagens 07c8 e 19a7 o uso do λ_{0_medImg} (que no caso de 07c8 este é igual ao λ_{0_maxL}) e o lado de 2,5km forneceram um ajuste mais adequado.

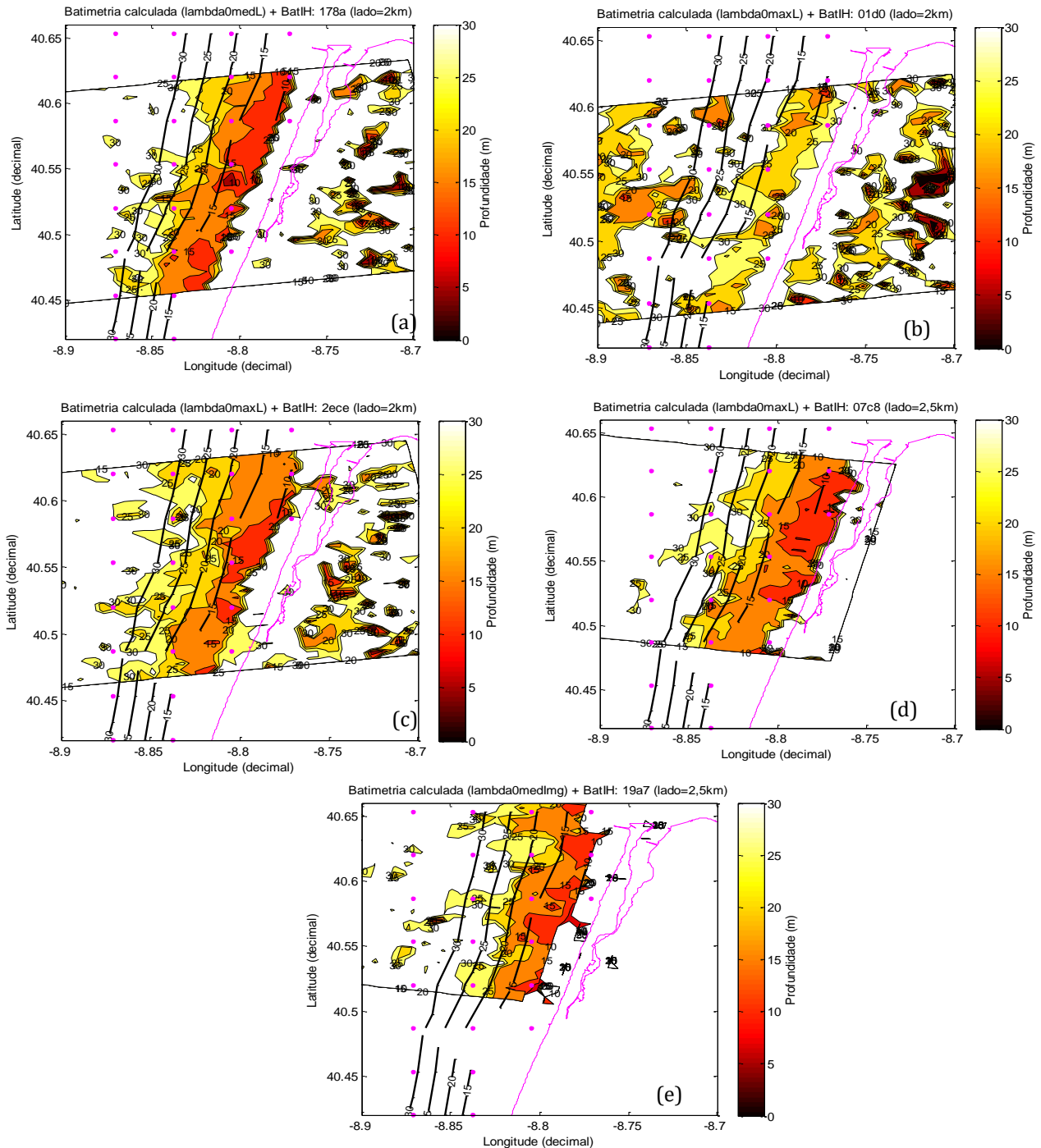


Figura 30 – Gráficos do melhor ajuste batimétrico para cada imagem. (a) Subimagem 178a. (b) Subimagem 01d0. (c) Subimagem 2ece. (d) Subimagem 07c8. (e) Subimagem 19a7.

O resultado batimétrico referente ao melhor ajuste para a subimagem *01d0* apresenta um padrão que difere bastante da informação batimétrica das restantes quatro imagens. Neste caso, observa-se uma faixa alongada paralela à linha de costa traçada, nomeadamente, pelas batimétricas calculadas dos 25 e dos 30 metros que se encontra, aproximadamente, entre as isolinhas dos 10 e dos 15 metros do IH. Existe, portanto, um avanço na direção da costa da batimetria calculada pelo método face à observada.

Os melhores ajustes para as imagens *178a*, *2ece*, *07c8* e *19a7* apresentam resultados cujos padrões são similares entre si e congruentes em determinados aspetos: (i) a isolinha calculada dos 15m, aproxima-se relativamente da observada (com exceção ao caso da imagem *07c8*) mas não traça uma linha contínua ao longo do setor; (ii) a batimétrica calculada dos 20m apresenta oscilações em torno da observada com reentrâncias em determinadas pontos para o largo e para a costa; (iii) as isolinhas estimadas dos 25 e dos 30 metros são as que mais se afastam das observadas correspondentes, não existindo um ajuste adequado entre ambas, mas apresentam reentrâncias com um padrão comum nas imagens *178a*, *2ece* e *07c8* (mais saliente nesta última) próxima da latitude 40,55 e longitude -8,87.

Para comparar qualitativamente o desvio entre a informação obtida e a observada, e identificar um possível padrão existente e perceptível comum a todas as imagens, efetuou-se a análise das batimétricas calculadas pelo método, de uma forma isolada. Para cada isolinha dos 10-30m é primeiramente exibido o gráfico que apresenta a linha batimétrica calculada e que forneceu melhor ajuste para cada imagem, e em seguida representada apenas a parte da linha que mais se aproxima da isolinha da carta do IH. De notar que as isolinhas mais próximas da linha de costa têm informação comprometida pelos dados de terra (aquando do processamento de cada imagem), pelo que não têm interesse prático. Os resultados batimétricos obtidos pelo método para a imagem *01d0* e os observados não exibiram uma concordância satisfatória, pelo que não são considerados nesta análise.

Batimétrica dos 10 metros

As batimétricas calculadas dos 10m não apresentam resultados satisfatórios (Figura 31). As isolinhas calculadas foram parcialmente traçadas e apenas em algumas imagens, sendo quase que residual. Por estas razões, esta informação é inútil para todas as quatro imagens, nesta análise.

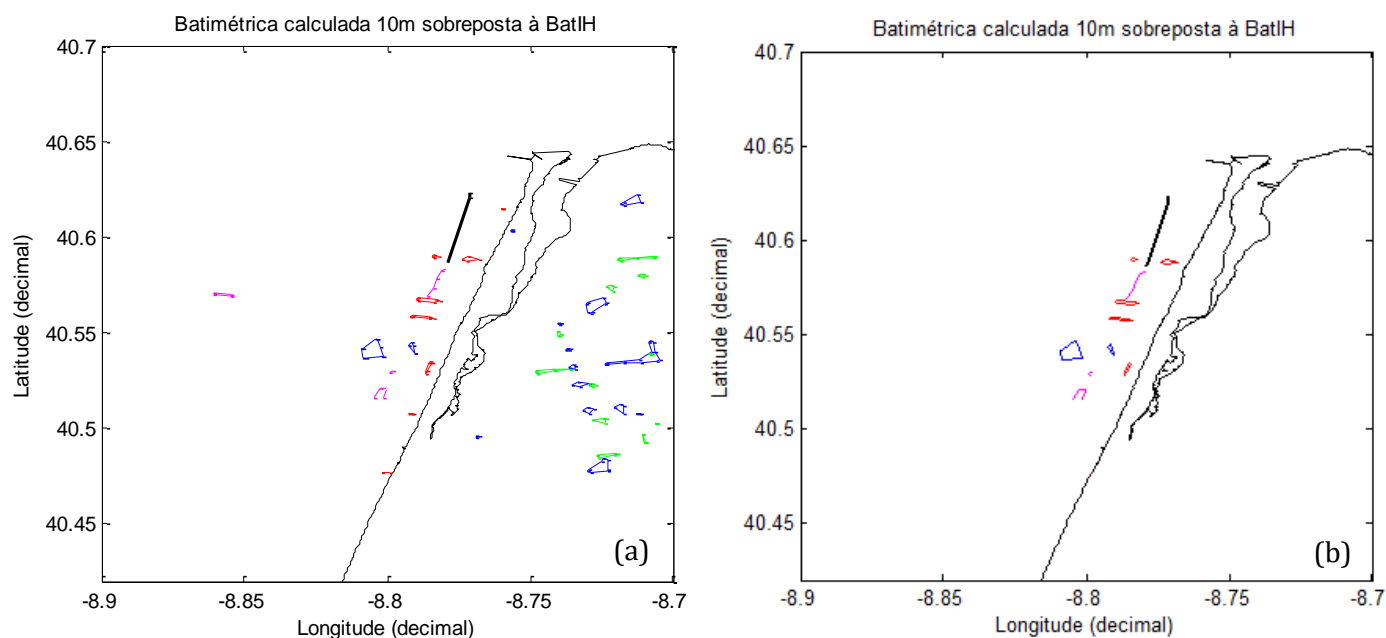


Figura 31 – (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 10m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a). Legenda: Linha de costa a preto que abrange a embocadura da laguna de Aveiro (norte) a preto; batimétrica dos 10m do IH a preto; batimétrica de *178a* a azul; batimétrica de *2ece* a verde; batimétrica de *07c8* a vermelho; batimétrica de *19a7* a rosa

Batimétrica dos 15 metros

No que diz respeito às batimétricas dos 15m estimada pelo método (Figura 32), observa-se uma aproximação relativa à observada correspondente, para as quatro imagens 178a, 2ece, 07c8 e 19a7. Consta-se que entre as latitudes 40,5 e 40,55, aproximadamente, existe uma interrupção do traçado contínuo nas quatro imagens. Esta observação pode ser explicada pela existência de um acidente geomorfológico ou uma estrutura no fundo que possa ter alterado as características do comportamento das ondas nesta zona, perceptível nas imagens em estudo. No caso da imagem 178a, a batimétrica é novamente traçada após esta descontinuidade. A isolinha calculada através desta imagem é a que melhor se ajusta à observada.

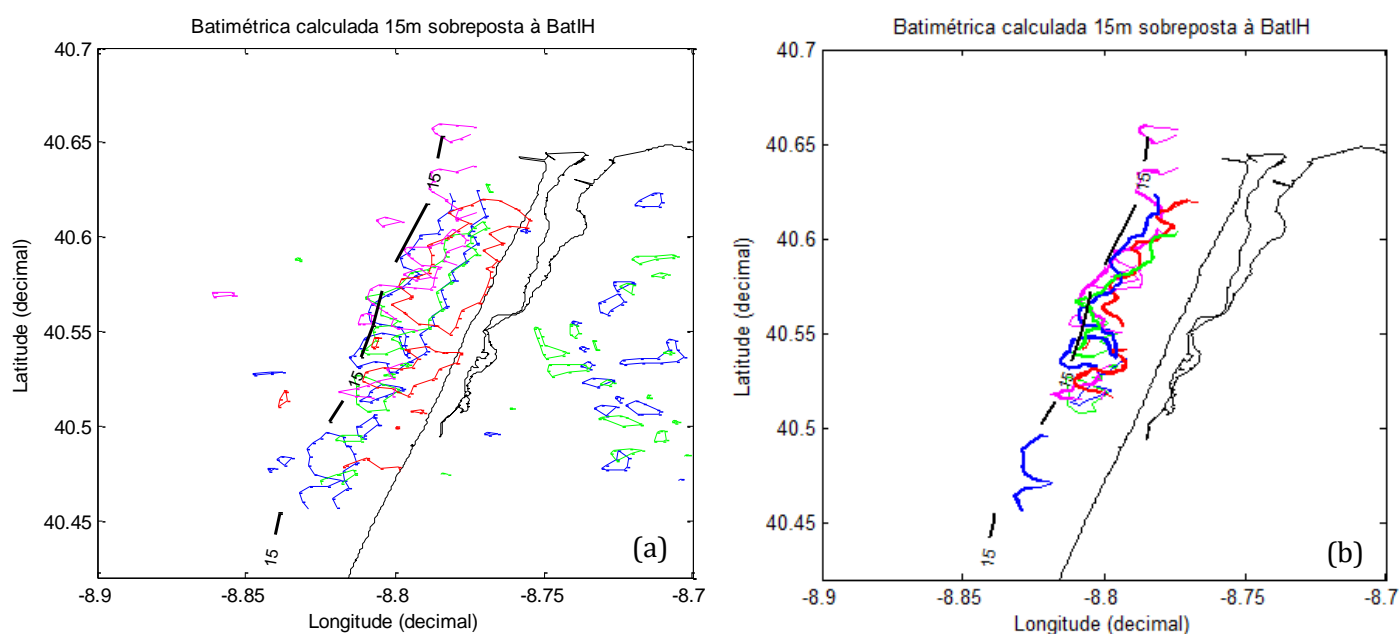


Figura 32 – (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 15m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a). Legenda: Linha de costa a preto que abrange a embocadura da laguna de Aveiro (norte) a preto; batimétrica dos 10m do IH a preto; batimétrica de 178a a azul; batimétrica de 2ece a verde; batimétrica de 07c8 a vermelho; batimétrica de 19a7 a rosa

Batimétrica dos 20 metros

As batimétricas estimadas dos 20m (Figura 33) circundam a isolinha observada de uma forma mais satisfatória. Verifica-se que o traçado das isolinhas calculadas é contínuo nas quatro imagens, não havendo interrupções. As batimétricas obtidas pelo método apresentam muitas curvas e destaca-se uma reentrância acentuada no caso da imagem 178a (azul) que não é observável ou comum nas restantes imagens. Na parte superior, as batimétricas referentes às imagens 07c8 (vermelho) e 19a7 (rosa) afastam-se ligeiramente da observada, contudo mantêm-se relativamente próximas desta ao longo do setor.

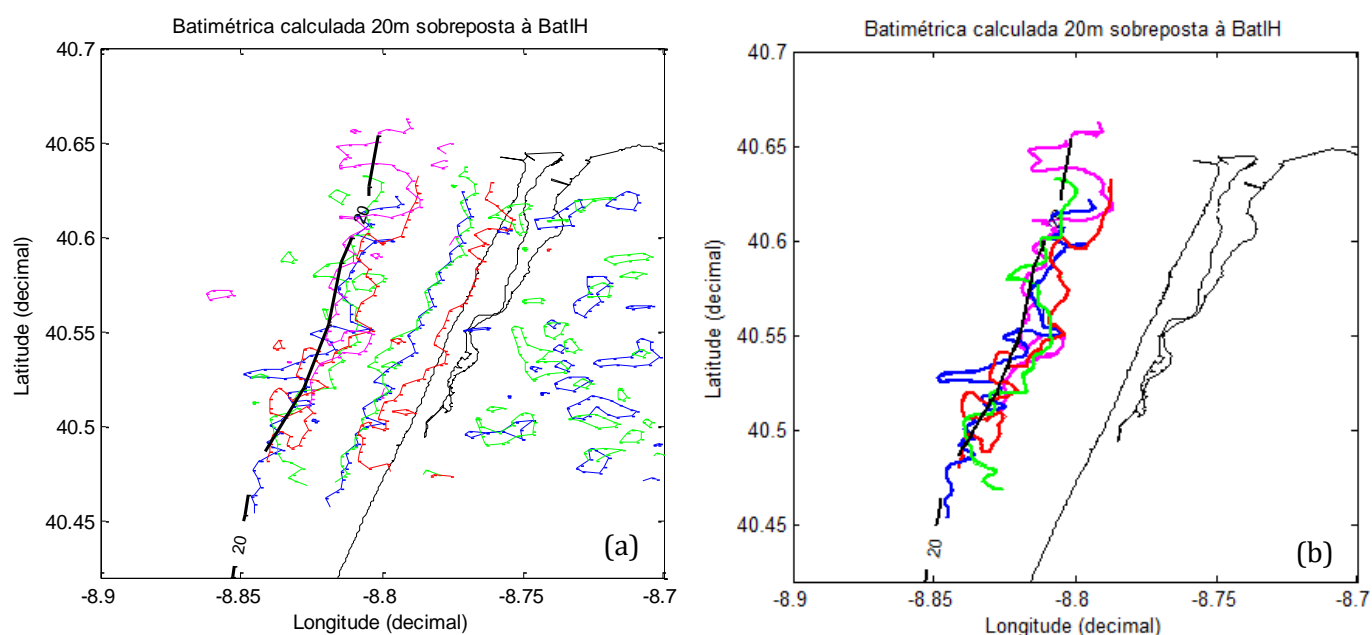


Figura 33 – (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 20m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a). Legenda: Linha de costa a preto que abrange a embocadura da laguna de Aveiro (norte) a preto; batimétrica dos 10m do IH a preto; batimétrica de 178a a azul; batimétrica de 2ece a verde; batimétrica de 07c8 a vermelho; batimétrica de 19a7 a rosa

Batimétrica dos 25 metros

As batimétricas calculados dos 25m (Figura 34) apresentam muitas curvas e mantêm-se relativamente próximas da observada. Na parte exterior são traçadas diversas ilhas de dimensões reduzidas ao longo do setor. Comparativamente aos gráficos anteriores que ilustram as batimétricas dos 15 e dos 20m, os resultados obtidos para as isolinhas dos 25m apresentam informação menos precisa. Verifica-se que as batimétricas correspondentes às imagens *2ece* (verde) e *19a7* (rosa) afastam-se da observada, apesar de não ser significativo e se manterem concordantes a esta ao longo do setor.

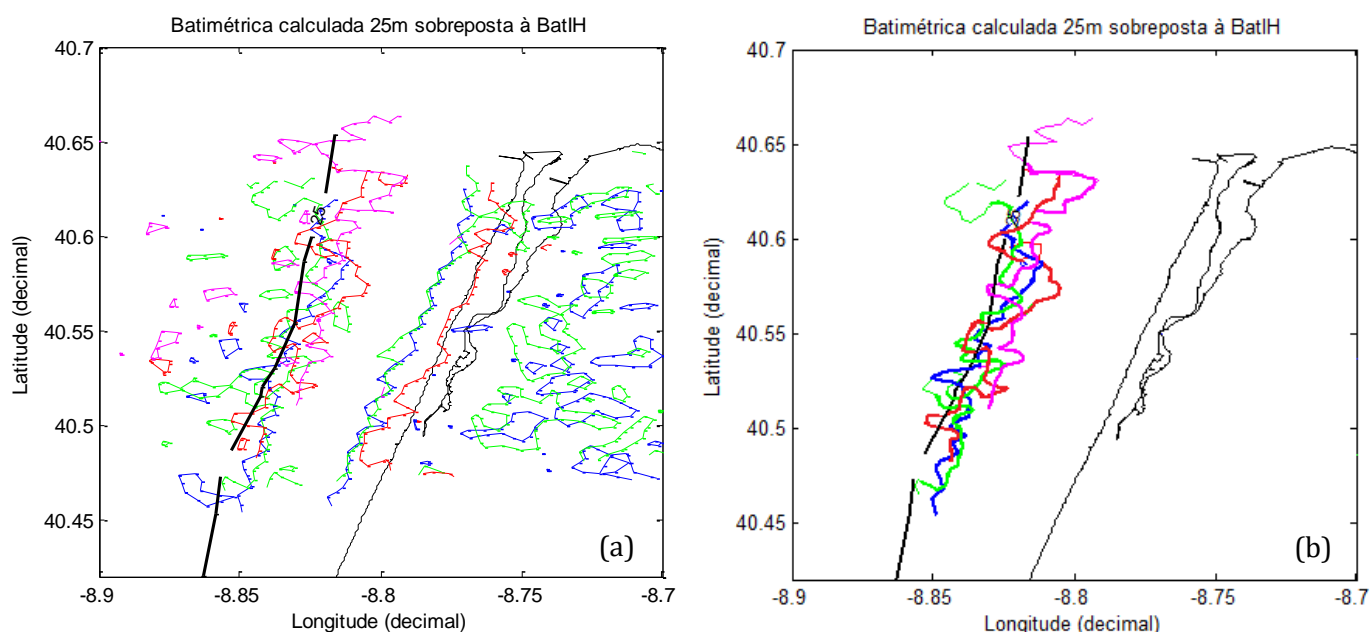


Figura 34 – (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 25m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a). Legenda: Linha de costa a preto que abrange a embocadura da laguna de Aveiro (norte) a preto; batimétrica dos 10m do IH a preto; batimétrica de *178a* a azul; batimétrica de *2ece* a verde; batimétrica de *07c8* a vermelho; batimétrica de *19a7* a rosa

Batimétrica dos 30 metros

As isolinhas dos 30m obtidas pelo método (Figura 35) apresentam um maior desvio da observada, comparativamente aos casos anteriores: as batimétricas calculadas são bastante sinuosas, circundam a observada e descrevem várias ilhas ao longo desta. As batimétricas referentes às imagens *178a* e *2ece* são as que menos se desviam da observada.

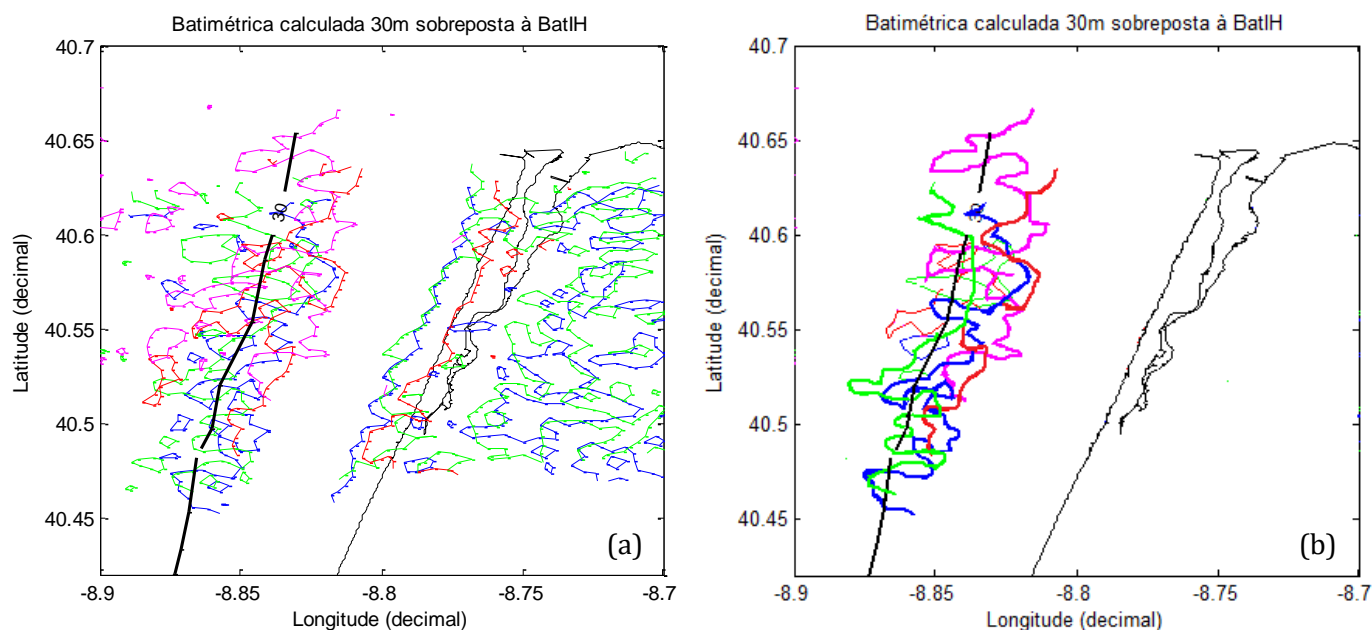


Figura 35 – (a) Representação gráfica das batimétricas calculadas dos 30m do produto com melhor ajuste para cada imagem. (b) Interpretação manual do resultado exibido em (a). Legenda: Linha de costa a preto que abrange a embocadura da laguna de Aveiro (norte) a preto; batimétrica dos 10m do IH a preto; batimétrica de *178a* a azul; batimétrica de *2ece* a verde; batimétrica de *07c8* a vermelho; batimétrica de *19a7* a rosa

CAPÍTULO 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais observações e conclusões efetuadas na elaboração do presente estudo, que pretendia desenvolver, testar e validar um método baseado em detecção remota, tendo por base o processamento de imagens adquiridas via satélite para a determinação da batimetria no setor praia da Mira-Aveiro.

Inicialmente, efetuou-se a pesquisa de imagens SAR que englobassem a área em estudo e em que fosse bem visível a ondulação da superfície oceânica. Após uma seleção de imagens, executou-se o processamento em Matlab com recurso a três algoritmos. A primeira rotina permite “recortar” a imagem total em subimagens que englobem áreas de maior interesse (domínios mais ao largo e junto à costa, cujas extensões são de 70 e 40km, respetivamente), sem perder a informação georreferenciada. O segundo algoritmo permite obter parâmetros referentes às características da onda, nomeadamente o comprimento de onda estimado ao longo de vários pontos do setor em estudo (λ), em metros. Nesta fase, definem-se os argumentos de entrada, salientando a dimensão do lado da célula (que percorre a imagem desde o largo até à costa) e o incremento executado pela mesma ao longo do setor. A partir dos valores calculados do comprimento de onda aplicaram-se diversas equações, partindo da teoria de dispersão linear das ondas, para determinar a profundidade para a área de interesse, em cada uma das cinco imagens. Um dos parâmetros de entrada neste cálculo é o comprimento de onda em águas profundas (λ_o), tendo sido considerados diversos valores: os calculados a partir do período de pico (T_p) medido na boia de Leixões, para o dia em que cada imagem foi adquirida, e o que é obtido fazendo a média dos comprimentos de ondas (estimados pelo segundo algoritmo) para os pontos da imagem localizados a profundidades superiores a 200m. Assim, o conjunto de valores de λ_o considerados foram o máximo, o médio e o mínimo de Leixões e o médio estimado diretamente na imagem. A validação do método testado baseia-se na comparação dos dados batimétricos calculados com os observados pelo Instituto Hidrográfico.

A fim de compreender qual a dimensão lateral da célula e o λ_o que melhor se adequam ao método, efetuaram-se testes de sensibilidade a estes dois parâmetros. Verificou-se que de, entre os valores de 1km, 2km e 2,5km (domínio costeiro) e de 4km (domínio ao largo), os resultados que apresentaram uma maior aproximação à costa são referentes à dimensão de 2km de lado da célula. Relativamente ao λ_o , o valor que mais se aproxima do λ_{o_medImg} é o que conduz a um melhor ajuste entre os dados calculados e os observados pelo IH. Em determinados casos, o λ_{o_maxL} é o mais adequado.

No caso da imagem 178a junto à costa, a batimetria calculada para o λ_{o_medL} (de ~308m que coincide com o λ_{o_medImg}) apresentou um melhor ajuste face a determinadas isolinhas observadas.

Os valores das profundidades calculadas para a imagem 01d0 não demonstram nenhum ajuste considerável com a batimetria observada. Contudo, nos resultados em que se considera o λ_{o_maxL} (~319m) e o λ_{o_medImg} (~371m), não há qualquer perda de

informação, ao contrário da aplicação dos restantes λ_0 para a mesma imagem. Neste caso, a diferença entre o λ_{0_maxL} e o λ_{0_medImg} é de 52m, sendo a menor distância entre λ_0 para esta imagem. A análise das condições de agitação marítima e meteorológicas para o dia em que a imagem foi adquirida (1 de março de 2015) não justifica o insucesso dos resultados obtidos. Num dia de temporal, no regime de inverno, é expectável os valores típicos de H_s serem muito próximos ou superiores a 5m e os de T_p ultrapassarem os 15s, porém, no dia 1 de março estes parâmetros foram sempre inferiores a esta gama de valores.

Quanto à imagem *2ece*, a batimetria determinada pelo método mostra uma determinada concordância à do Instituto, principalmente quando se considera o λ_{0_maxL} (~319m).

A batimetria estimada para o caso da imagem *07c8* (de 30 de janeiro de 2015), no geral, apresenta um recuo face à do IH. Contudo, existe uma certa aproximação entre a batimétrica calculada dos 20 metros e a observada, quando se considera λ_{0_maxL} (de ~435m). Este parâmetro coincidente com o λ_{0_medImg} , o que poderá justificar a concordância observada. No dia em que a imagem foi adquirida, as condições meteorológicas e de agitação marítima eram típicas de um dia de temporal do regime de inverno. De notar que, na subimagem *07c8* que apresenta o domínio junto à costa (Figura 11), o *swell* é muito bem definido, sendo expectável a obtenção de resultados muito satisfatórios relativamente ao ajuste entre os dados calculados e os medidos pelo IH. Contudo, tal não se verificou. A explicação deste facto poderá residir na elevada variabilidade dos valores de T_p para o dia da aquisição da imagem, porque no mesmo local pode coexistir uma multiplicidade de componentes de onda, no momento da aquisição. Assim sendo, aquando do processamento da imagem pela técnica de FFT, o sinal detetado pode não ser tão claro.

Relativamente à imagem *19a7*, os resultados não apresentam um ajuste adequado. Contudo, quando se considera o λ_{0_maxL} (de ~244m), verifica-se uma determinada concordância entre a batimétrica calculada dos 20 metros e a observada.

Em todos os casos, verificou-se que a consideração do λ_0 mínimo no cálculo conduziu aos piores resultados, não havendo um ajuste adequado entre as batimetrias estimadas e as do Instituto Hidrográfico. O λ_{0_maxL} e o λ_{0_medImg} permitem obter resultados satisfatórios, pois verificou-se concordância entre determinadas batimétricas calculadas e observadas, nomeadamente das dos 15 e dos 20m para as subimagens *178a*, *2ece* e *07c8*, junto à costa.

O método testado não funciona para profundidades superiores a 30m. Por outro lado, apresenta limitações junto a terra. De facto, o método é incapaz de estimar a profundidade numa faixa próxima da linha de costa, onde não é possível calcular o comprimento de onda λ , estimado pelo segundo algoritmo (excetuando-se os resultados da imagem *07c8* onde existe uma maior aproximação à costa, relativamente às restantes imagens.). A consideração de 4km para a dimensão da célula (subimagens ao largo) resultou num afastamento considerável da costa, no cálculo dos λ , pelo que se consideraram os 2 e os 2,5km para subimagens mais junto à costa, uma vez que se

ganha alguma proximidade a terra e se identificam concordâncias consideráveis entre os valores de profundidade calculados e os observados. Os resultados obtidos com 2 e 2,5km para a dimensão da célula apresentam algumas diferenças e a aproximação à costa é ligeiramente maior no caso dos 2km. No que diz respeito ao ajuste entre as batimétricas, para as imagens *178a*, *2ece*, *01d0*, a célula de 2km forneceu uma melhor concordância entre os dados calculados e os observados. Nas imagens *07c8* e *19a7*, a dimensão de 2,5km permitiu obter algum ajuste. Esta limitação não permite identificar a existência das barras submersas interna e externa, localizadas entre os 200 e os 900m de distância da praia emersa e a profundidades inferiores a 10m.

No que diz respeito à variabilidade dos λ_0 para cada imagem, as imagens *01d0* e *07c8* apresentaram uma maior diferença entre o λ_{0_medImg} e os restantes λ_0 . No primeiro caso, o λ_{0_medImg} foi de $\sim 371m$ e distanciou-se em $\sim 154m$ do λ_{0_min} ; em $\sim 118m$ do λ_{0_medL} ; em $\sim 52m$ do λ_{0_maxL} e em $\sim 128m$ do λ_{0_aquis} . Na imagem *07c8*, a diferença do λ_{0_medImg} (de $\sim 437m$ e coincidente com o λ_{0_maxL} e o λ_{0_aquis2}) foi de $\sim 265m$ para o λ_{0_minL} ; de $\sim 120m$ para o λ_{0_medL} e de $\sim 67m$ para o λ_{0_aquis1} . A ausência de concordância batimétrica para a imagem *01d0* pode relacionar-se com a elevada variabilidade entre os λ_0 , tendo em conta o λ_{0_medImg} . Salienta-se o caso da imagem *178a* que apresenta a menor variabilidade entre os λ_0 (tendo em conta as cinco imagens) e os resultados para cada λ_0 exibem o ajuste mais adequado entre as profundidades obtidas pelo método e as do IH.

A observação das batimétricas calculadas dos 10-30m isoladas para o caso em que se observou o melhor ajuste (para cada imagem) possibilita uma análise mais detalhada e concisa. Excluiu-se a imagem *01d0* nesta análise. Efetuou-se, ainda, uma interpretação manual com base na representação gráfica obtida pelo Matlab. O método não foi capaz de traçar as isolinhas dos 10m, uma vez que os dados para estas profundidades eram praticamente residuais. As batimétricas calculadas dos 15m aproximam-se da observada e identifica-se uma descontinuidade local no traçado, sendo comum nas quatro imagens. As isolinhas dos 20m e dos 25m descreveram muitas curvas e algumas reentrâncias, circundando as respetivas do IH. As batimétricas dos 30m apresentam uma maior divergência face à observada e são bastante sinuosas. O método é, portanto, aplicável a profundidades dos 15 aos 25 metros.

Em síntese, o método testado não forneceu resultados totalmente satisfatórios, porém permitiu obter uma determinada concordância entre as batimétricas dos 15 e dos 20m e as respetivas observadas, atendendo à aplicação do λ_{0_medImg} e o λ_{0_maxL} que considera o T_p medido pela boia ondógrafo e a célula de 2km de lado.

Um dos objetivos do presente estudo era comparar as profundidades estimadas pelo método e os dados obtidos em levantamentos batimétricos efetuados numa campanha de campo, a 13 de fevereiro de 2015, que engloba o setor Mira-Poço da Cruz. Contudo, para cotas superiores a 10m, os dados recolhidos na campanha têm muito ruído associado à sonda utilizada e verificou-se uma discrepância na posição do fundo marinho relativamente ao que seria expectável ao comparar com levantamentos batimétricos anteriores (Batista, comunicação pessoal). Por estas razões, os dados da

campanha não são usados como elemento comparativo à informação batimétrica estimada.

5.1. Considerações futuras

Na análise dos resultados obtidos pelo método, constatou-se que, em todos os casos, as batimétricas calculadas descrevem muitas curvas, o que se deve à existência de algum ruído nos dados. A aplicação de um filtro aos valores do λ_0 poderá conduzir a valores da profundidade com menor variabilidade espacial e alisar as batimétricas calculadas.

A consideração da direção do vento para o dia da aquisição de cada imagem poderá ajudar a compreender determinados resultados menos satisfatórios. No caso da zona de estudo, o vento de leste não se deve traduzir na geração de vagas, enquanto o vento proveniente de oeste cria tensão na superfície oceânica e pode originar irregularidades na estrutura da onda, detetável na imagem.

A comparação efetuada entre a informação batimétrica calculada pelo método e a observada pelo IH é qualitativa, sendo que uma análise quantitativa dos dados se torna necessária.

Os dados batimétricos medidos pelo Instituto Hidrográfico são referentes ao Zero Hidrográfico (Z.H.), sendo um plano de referência convencionado, situado abaixo do nível da maré astronómica mais baixa, e estabelecido 2,00 m abaixo do nível médio do mar, para Portugal continental. Os dados das profundidades obtidos pelo método não foram corrigidos do datum altimétrico. Para isso, deverão considerar-se os níveis da maré (por exemplo, os níveis de maré astronómica em Aveiro) na hora da aquisição de cada imagem e aplicar alguns cálculos. Desta forma, aos dados da profundidade calculados pelo método deverão ser subtraídos os seguintes valores para cada caso em todas as imagens: 1,10m (na 178a); 1,33m (na 01d0); 2,61 (na 2ece); 1,40m (na 07c8) e 3,36m (na 19a7). Assim, as batimétricas calculadas recuarão cerca de 1m de profundidade, no caso das imagens 178a, 01d0 e 07c8, e 2,5m e cerca de 3,5m para as imagens 2ece e 19a7, respetivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brusch, S., Held, P., Lehner, S., Rosenthal, W., Pleskachevsky, A. (2011). Underwater bottom topography in coastal areas from TerraSAR-X data. *International Journal of Remote Sensing*, 32:16, 4527-4543
- Calkoen, C. J., Hesselmanns, G. H. F. M., Wensink, G. J. & Vogelzang, J. (2001). The Bathymetry Assessment System: Efficient depth mapping in shallow seas using radar images, *International Journal of Remote Sensing*, 22:15, 2973-2998
- Cochran, W. T., Cooley, J. W., Favon, D. L., Helms, H. D., Kaenel, R. A., Lang, W. W., ... & Welch, P. D. (1967). What is the fast Fourier transform?. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1664-1674
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2009). Potential Effects of Climate Change on Northwest Portuguese Coastal Zones, *ICES Journal of Marine Science*, 66: pp. 1497–1507
- Cunha, T. (2016). Determinação do comprimento de onda de ondas marítimas a partir da FFT de imagens aéreas da superfície do mar, DETI, Universidade de Aveiro (não publicado)
- Ferreira, O. (1993) Caracterização dos principais factores condicionantes do balanço sedimentar e da evolução da linha de costa entre Aveiro e o Cabo Mondego. Lisboa: Universidade de Lisboa. Dissertação de mestrado
- Gao, J. (2009). Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, 33(1), 103-116.
- Hell, B., Broman, B., Jakobsson, L., Jakobsson, M., Magnusson, Å., & Wiberg, P. (2012). The use of bathymetric data in society and science: a review from the Baltic Sea. *Ambio*, 41(2), 138-150.
- Huang, W.G., Fu, B., Zhou, C.B., Yang, J.S., Shi, A.Q. and Li, D.L. (2001) Shallow Water Bathymetric Surveys by Spaceborne Synthetic Aperture Radar. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. 6, Sydney, 9-13 July 2001, 2810-2812.
- Jawak, S.D., Vadlamani, S.S., Luis, A.J. (2015) A Synoptic Review on Deriving Bathymetry Information Using Remote Sensing Technologies: Models, Methods and Comparisons. *Advances in Remote Sensing*, 4, 147-162
- Kearns, T.A. & Breman, J. (2010) Bathymetry—The Art and Science of Seafloor Modelling for Modern Application. *Ocean Globe*, 1-36
- Kinsman, B. (1965). *Wind waves: their generation and propagation on the ocean surface*. Courier Corporation.
- Lafon V., Capo S., Lubac B., Marieu V., Dehouck A., Sénéchal N., (2012) Coastal Bathymetry Mapping Using High-Resolution Optical Imagery. *Sentinel 2 Preparatory Symposium*, 23-27 avril 2012, Frascati – Italie
- Lee Z.P., K. L. Carder K.L., Arnone R. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41, 5755–5772

- Lira, C. & Taborda, R. (2014) Advances in Applied Remote Sensing to Coastal Environments Using Free Satellite Imagery. In: Remote Sensing and Modeling. Springer International Publishing, p. 77-102
- Mallet, C. & Bretar, F. (2009) Full-Waveform Topographic Lidar: State-of-the-Art. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64, 1-16
- Mishra, M.K., Ganguly, D., Chauhan, P., Ajai (2014) Estimation of Coastal Bathymetry Using RISAT-1 C-Band Microwave SAR Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. N.º 3, Vol. 11, p. 671-675
- Rey, S., & Bernardes, C. (2004). Short-term morphodynamics of intertidal bars – the case of Areão Beach (Aveiro, northwest Portugal). *Journal of Coastal Research*, 588-593.
- Richards, J. A., & Jia, X. (1999). Remote sensing digital image analysis. Berlin, Alemanha: Springer-Verlag.
- Robinson, I.S. (2004) Measuring the Oceans from Space: The Principles and Methods of Satellite Oceanography. Praxis Publishing, Chichester, 451-508
- Sentinel-1 Team (2013). Sentinel-1 User Handbook. European Space Agency
- Splinter, K. D., & Holman, R. A. (2009). Bathymetry Estimation from Single-Frame images of nearshore waves. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(9), 3151-3160
- Wang, C.-K. & Philpot, W.D. (2007) Using Airborne Bathymetric Lidar to Detect Bottom Type Variation in Shallow Waters. *Remote Sensing of Environment*, 106,123-35
- Weisstein, Eric W. "Discrete Fourier Transform." From MathWorld--A Wolfram Web Resource. Consultado a 2 de outubro de 2016: <http://mathworld.wolfram.com/DiscreteFourierTransform.html>

SITES CONSULTADOS

<http://earthexplorer.usgs.gov/>

<http://landsat.usgs.gov//index.php>

https://lta.cr.usgs.gov/products_overview

<http://oceanservice.noaa.gov/facts/bathyuses.html>

<http://pordlabs.ucsd.edu/rsalmon/111.textbook.pdf>

<https://scihub.copernicus.eu/>

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>

<http://snirh.pt/index.php?idMain=2&idItem=1>

<http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/index.html>

<http://www.hidrografico.pt/download-gratuito.php>

https://www.ipma.pt/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faqdetail.html?f=/pt/educativa/faq/meteorologia/previsao/faq_0032.html

<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft2.html>

<http://www.meteofermentelos.com/weatherdata.php?year=2015&data=windgust>

<https://www.usgs.gov/>

Anexos

Anexo 1

Tabela 1 - Principais características dos sensores dos satélites *Landsat 8, 7, 4 e 5*

<i>Satélite</i>	<i>Sensor</i>	<i>Banda espectral</i>	<i>Região (μm)</i>	<i>Resolução espacial (m)</i>	<i>Resolução radiométrica (bits)</i>	<i>Ciclo (dias)</i>	<i>Largur a da faixa (km)</i>
Lansat 8	OLI	1. Aerossol costeiro	0,43–0,45	30	16	16	185
		2. Azul	0,45–0,51				
		3. Verde	0,53–0,59				
		4. Vermelho	0,64–0,67				
		5. NIR	0,85–0,88				
		6. SWIR 1	1,57–1,65				
		7. SWIR 2	2,11–2,29				
		8. PAN	0,50–0,68	15			
		9. <i>Cirrus</i>	1,36–1,38	30			
	TIRS	10. IV Térmico	10,60–11,19	100			
11. IV Térmico		11,50–12,51					
Landsat 7	ETM+	1. Azul	0,45–0,52	30	8	16	185
		2. Verde	0,52–0,60				
		3. Vermelho	0,63–0,69				
		4. NIR	0,77–0,90				
		5. NIR	1,55–1,75				
		6. IV Térmico	10,40–2,50	60			
		7. MIR	2,08–2,35	30			
		8. PAN	0,52–0,90	15			
Landsat 4 e 5	TM	1. Azul	0,45–0,52	30	8	16	185
		2. Verde	0,52–0,60				
		3. Vermelho	0,63–0,69				
		4. NIR	0,76–0,90				
		5. NIR	1,55–1,75				
		6. IV Térmico	10,40–1,50				
		7. MIR	2,08–2,35	120			

Abreviaturas: NIR – *Near Infrared*, SWIR – *Shortwave Infrared*, MIR – *Middle Infrared*, PAN – *Panchromatic*

Fonte: adaptado de Lira & Taborda (2014)

Anexo 2

Tabela 2 – Organização preliminar das imagens extraídas do site *SciHub*.

Nome	Data	Estado	Zona	Instrumento	Satélite
77EE	14/12/2015	Swell (mt bom)	Aveiro + Figueira da Foz	SAR-C	Sentinel1
28AB	12/01/2015	Swell (bom)	A + F	SAR-C	Sentinel1
F821	03/09/2015	Ausente	A	"	"
E7C0	25/12/2014	Swell (bom)	A + F	"	"
1676	03/09/2015	Nada	–	"	"
FD3E	03/09/2015	Ausente	F	"	"
2F99	26/11/2015	Nada	–	"	"
875F	02/12/2015	Nada	–	"	"
9245	17/06/2015	Nada	–	"	"
A4C3	28/08/2015	Falha download	–	"	"
134D	09/09/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
30CB	20/12/2015	Falha download	–	"	"
5CD5	25/01/2016	Swell (bom)	A + F	"	"
64B0	18/04/2015	Swell (fraco)	A + F	"	"
BF13	25/03/2015	Ausente	A + F	"	"
8DC8	14/12/2015	Nada	–	"	"
C23C	16/08/2015	Swell	A + F	"	"
2655	11/07/2015	Swell (fraco)	A + F	"	"
2170	05/02/2015	Swell (mt fraco)	A + F	"	"
7152	05/07/2015	Nada	–	"	"
ADBC	06/02/2016	Swell	F	"	"
1E 35	31/01/2016	Falha download	–	"	"
1F59	01/11/2014	Swell (mt bom)	A + F	"	"
235B	06/02/2016	Nada	–	"	"
19A7	23/02/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
368D	08/12/2015	Nada	–	"	"
D823	27/10/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
CAB5	09/09/2015	Nada	–	"	"
39BE	31/01/2016	Swell (Porto)	–	"	"
B24D	01/12/2014	Swell (bom)	A + F	"	"
Ø478	19/03/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
6D8E	18/05/2015	Nada	–	"	"
8569	13/01/2016	Nada	–	"	"
F12C	30/05/2015	Falha download	–	"	"
9A6D	30/04/2015	Ausente	A + F	"	"
801D	19/12/2014	Swell (mt bom)	A + F	"	"
CB98	23/07/2015	Swell	A + F	"	"
8C1F	09/10/2015	Swell (preta no limite)	A	"	"
52C1	23/06/2015	Nada	A + F	"	"
84A1	01/03/2016	Nada	F	"	"

9EE6	12/02/2016	Swell (mt fraco)	A + F	"	"
7EE2	06/04/2015	Swell (mt bom)	A + F	"	"
CB85	06/02/2016	Nada	A + F	"	"
DAB1	03/10/2015	Ausente	A + F	"	"
CFCB	18/05/2015	Swell (A)	A + F	"	"
E045	02/11/2015	Swell (fraco) - dúvida	A	"	"
2490	26/11/2015	Swell (mt bom)	F	"	"
439E	08/12/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
35 E 8	30/05/2015	Swell (mt fraco)	A + F	"	"
Ø677	09/10/2015	Nada	A + F	"	"
2BFF	21/10/2015	Nada	A + F	"	"
C198	25/01/2016	Nada	A + F	"	"
2BEE	18/02/2016	Nada	A + F	"	"
2CD3	14/11/2015	Nada	A + F	"	"
42B6	18/04/2015	Nada	A + F	"	"
AEC6	22/08/2015	Não (faixa preta costa)	A	"	"
4569	03/10/2015	Nada	A + F	"	"
72AF	06/05/2015	(Lisboa)	–	"	"
01DØ	01/03/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
B52C	08/11/2015	Não - faixa preta	A + F	"	"
CB0A	06/05/2015	Nada	A + F	"	"
6F3B	24/02/2016	Nada	A + F	"	"
2ECE	13/03/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
20A6	01/01/2016	Swell (mt bom)	A + F	"	"
9755	13/01/2016	Swell (mt fraco)	A	"	"
00AC	12/05/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
A5D5	26/12/2015	Nada	A + F	"	"
3CDØ	23/07/2015	Nada	A + F	"	"
14B3	12/02/2015	Nada	A	"	"
75FØ	19/01/2016	Nada	A + F	"	"
0A27	13/01/2016	Swell (mt fraco)	F	"	"
45E 4	27/09/2015	Swell (fraco)	A	"	"
949F	19/03/2016	Nada	A + F	"	"
5F71	11/06/2015	Nada	A + F	"	"
FC78	12/04/2015	Swell	A + F	"	"
B138	02/11/2015	Falha download	–	"	"
AFAF	23/06/2015	Swell (fraco)	A + F	"	"
		Dúvida - partes pretas			
B991	02/12/2015	A	A + F	"	"
C71Ø	12/04/2015	Falha download	A + F	"	"
AC98	06/04/2015	Falha download	A + F	"	"
07C8	30/01/2015	Swell (mt bom)	A + F	"	"
EE66	12/05/2015	Nada	A + F	"	"
1BF5	15/09/2015	Swell (bom)	F	"	"
A993	08/10/2014	Swell (fraco)	A + F	"	"
52EØ	01/03/2016	Swell (mt fraco)	A	"	"

Ø505	11/06/2015	Ausente	A + F	"	"
3439	25/03/2015	Nada	A + F	"	"
551E	01/01/2016	Nada	A + F	"	"
30C8	30/04/2015	Falha download	A + F	"	"
A683	01/03/2016	Falha download	A	"	"
6437	11/07/2015	Nada	A + F	"	"
FF84	29/07/2015	Não - faixa preta costa	A + F	"	"
3118	03/09/2015	Falha download	F	"	"
5301	21/09/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
ØAB4	07/03/2015	Swell	A + F	"	"
A86F	09/09/2015	Falha download	F..	"	"
ACF5	01/03/2016	Swell	F	"	"
1920	02/11/2015	Nada	A	"	"
57A3	04/08/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
B883	26/12/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
A4B5	17/07/2015	Swell (mt fraco)	A + F	"	"
49D7	19/01/2016	Swell (mt bom)	A + F	"	"
B45A	12/05/2015	Nada	A + F	"	"
1F04	26/11/2015	Swell (mt bom)	A	"	"
E8D6	18/05/2015	Falha download	A + F	"	"
EAE3	23/06/2015	Falha download	F..	"	"
2503	25/11/2014	Swell (mt bom)	A + F	"	"
E305	19/03/2015	Falha download	A + F	"	"
2799	15/10/2015	Nada	A + F	"	"
59D6	22/08/2015	Nada	F..	"	"
534F	24/02/2016	Swell (mt fraco)	A + F	"	"
C498	07/03/2016	Ausente	A + F	"	"
C1E 2	21/09/2015	Nada	A + F	"	"
2E 61	08/11/2015	Nada	A + F	"	"
...113956	03/02/2016	Nada	F	MSI	Sentinel-2
50A9	24/05/2015	Falha download	A + F	SAR-C	Sentinel-1
EFA3	20/12/2015	Swell (mt bom)	F	"	"
8493	24/04/2015	Swell (bom)	A + F	"	"
ABE1	13/03/2015	Falha download	A + F	"	"
Ø3A6	16/08/2015	Falha download	A + F	"	"
6B42	18/01/2015	Swell	A + F	"	"
8C6E	04/08/2015	Falha download	A + F	"	"
82D3	05/06/2015	Swell (mt fraco mm)	A + F	"	"
E35F	20/12/2015	Swell (bom)	A	"	"
32E 4	17/06/2015	Ausente	A + F	"	"
40E Ø	28/08/2015	Ausente	A + F	"	"
3BB5	20/12/2015	Falha download	F	"	"
4EBF	20/11/2015	Swell (dúvida) - faixa	A + F	"	"
D30B	15/10/2015	Swell (F só/ A preta)	A + F	"	"

8FE8	20/11/2015	Falha download	A + F	"	"
4E 06	14/10/2014	Swell (bom)	A + F	"	"
4F00	05/07/2015	Swell	A + F	"	"
8BFC	17/07/2015	Falha download	A + F	"	"
9A24	18/02/2016	Swell (bom)	A + F	"	"
4427	05/06/2015	Falha download	A + F	"	"
7CD9	04/08/2015	Falha download	F..	"	"
370A	27/10/2015	Falha download	A + F	"	"
1D49	26/11/2015	Falha download	F	"	"
A796	06/05/2015	Swell (dúvida) - faixa	A + F	"	"
6F0E	24/05/2015	Ausente	A + F	"	"
8872	21/10/2015	Ausente	A	"	"
7921	31/03/2015	Falha download	F..	"	"
2C4D	24/04/2015	Falha download	F..	"	"
B9A3	07/03/2015	Falha download	A + F	"	"
5FCA	29/07/2015	Falha download	A + F	"	"
9C39	22/08/2015	Falha download	A	"	"
357D	24/04/2015	Falha download	A + F	"	"
72F1	31/03/2015	Falha download	A + F	"	"
DECF	12/02/2016	Falha download	A + F	"	"
B29E	15/09/2015	Swell (mt bom)	A	"	"
D669	16/08/2015	Falha download	F..	"	"
3F69	31/03/2015	Swell (mt bom)	A + F	"	"
7422	12/05/2015	Swell (bom) - A	A + F	"	"
8EF5	17/02/2015	Falha download	A + F	"	"
2831	07/03/2016	Falha download	A + F	"	"
93E 4	15/09/2015	Falha download	A	"	"
178A	17/02/2015	Swell (bom)	A + F	"	"

Anexo 3

Tabela 3 – Organização final de algumas imagens extraídas do site *SciHub*

			Imagem	
2014	Outubro	8	A993	fraco/ a+f
	Novembro	1	1F59	mt bom/ a+f
	Dezembro	1	B24D	
		19	801D	
		25	E7C0*	
2015	Janeiro	12	28AB*	
		30	07C8	mt bom/ a+f
	Fevereiro	5	2170	mt fraco/ a+f
		17	8EF5 178A	bom/ a+f
		23	19A7	bom/ a+f
	Março	1	01DØ	
		7	ØAB4* B9A3	
		13	2ECE ABE1	
		19	Ø478 E305	
		25	BF13	
		31	7921 72F1 3F69	
	Abril	6	7EE2* AC98	
		12	FC78* C71Ø	
		18	64B0	
		24	8493 2C4D 357D	
		30	9A6D 30C8	
	Maio	6	A796*	
		12	00AC* B45A 7422	
		18	CFCB* E8D6	
		24	50A9 6F0E	
		30	35E 8	
	Junho	5	82D3* 4427	
		11	Ø505	
		17	32E 4	
		23	AFAF* EAE3	
	Julho	5	4F00	
		11	2655 6437	
		17	A4B5 8BFC	
		23	CB98*	

	Agosto	29	FF84	5FCA	
		4	57A3	8C6E	7CD9
		16	C23C	Ø3A6	
		22	AEC6	59D6	9C39
	Setembro	28	A4C3	40E Ø	
		3	F821	FD3E	3118
		9	134D	A86F	
		15	1BF5	B29E	93E 4
		21	5301	C1E 2	
		27	45E 4*		
	Outubro	3	DAB1		
		9	8C1F*		
		15	2799	D30B	
		21	8872		
		27	D823	370A	
	Novembro	2	E045*	B138	1920
		8	B52C	2E 61	
		20	4EBF*	8FE8	
		26	1D49	2490	1F04
	Dezembro	2	B991*		
		8	439E		
		14	77EE		
		20	30CB	EFA3	E35F 3BB5
		26	B883		
2016	Janeiro	1	20A6		
		13	0A27	9755	
		19	49D7		
		25	5CD5		
	Fevereiro	6	ADBC		
		12	9EE6	DECF	
		18	9A24		
		24	534F		
	Março	1	ACF5	52EØ	A683
		7	C498	2831	

bom/ f/ a
bom/ a+f
fraco/ a
a
f
bom / a+f
fraco/ a
a + f
mt bom/ f/ a

Anexo 4

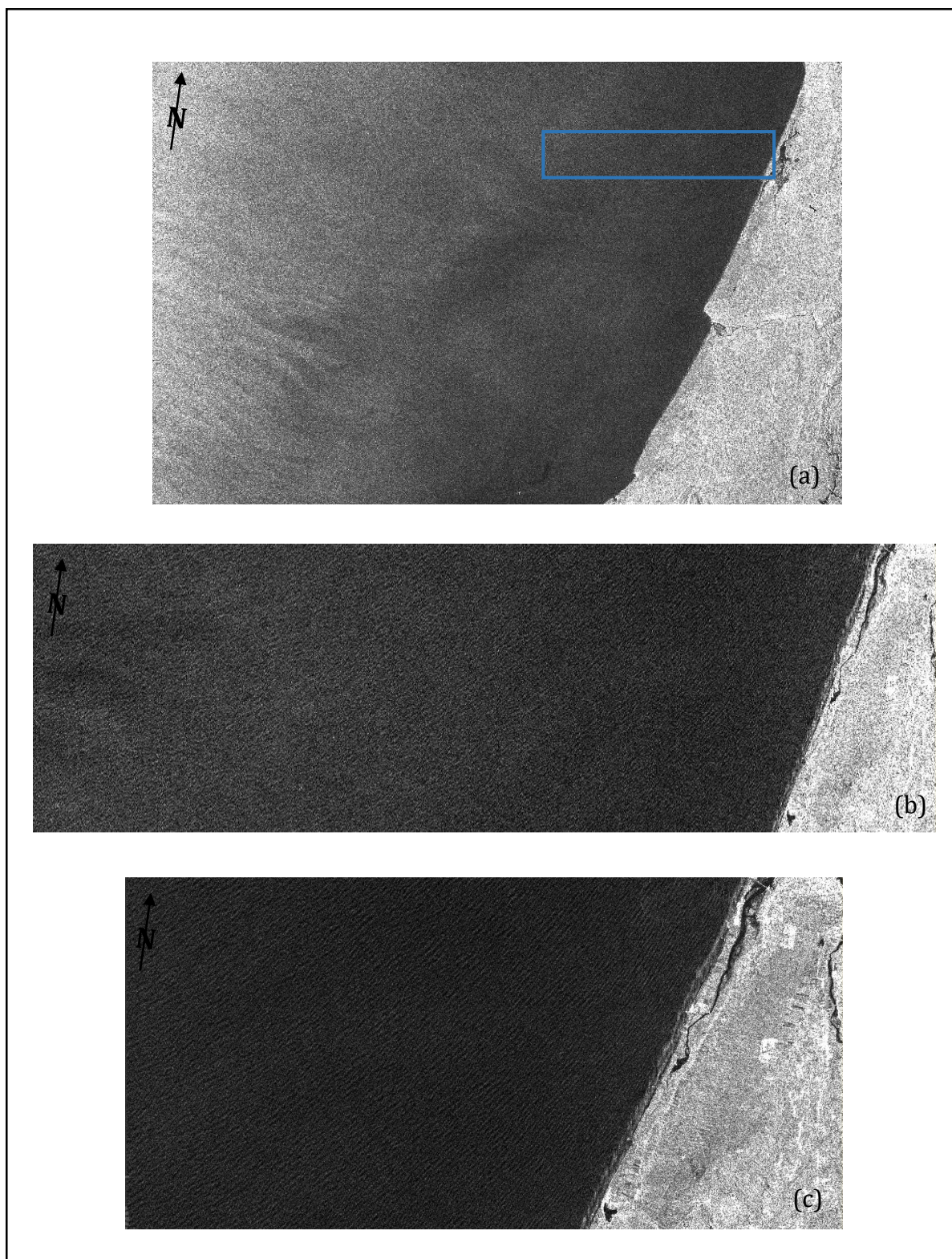


Figura 1 – Secções referentes à imagem 01d0. (a) Imagem 01d0 total, em que o retângulo azul limita a área da subimagem ao largo. (b) Subimagem 01d0 – domínio ao largo. (c) Subimagem 01d0 – domínio junto à costa

Anexo 5

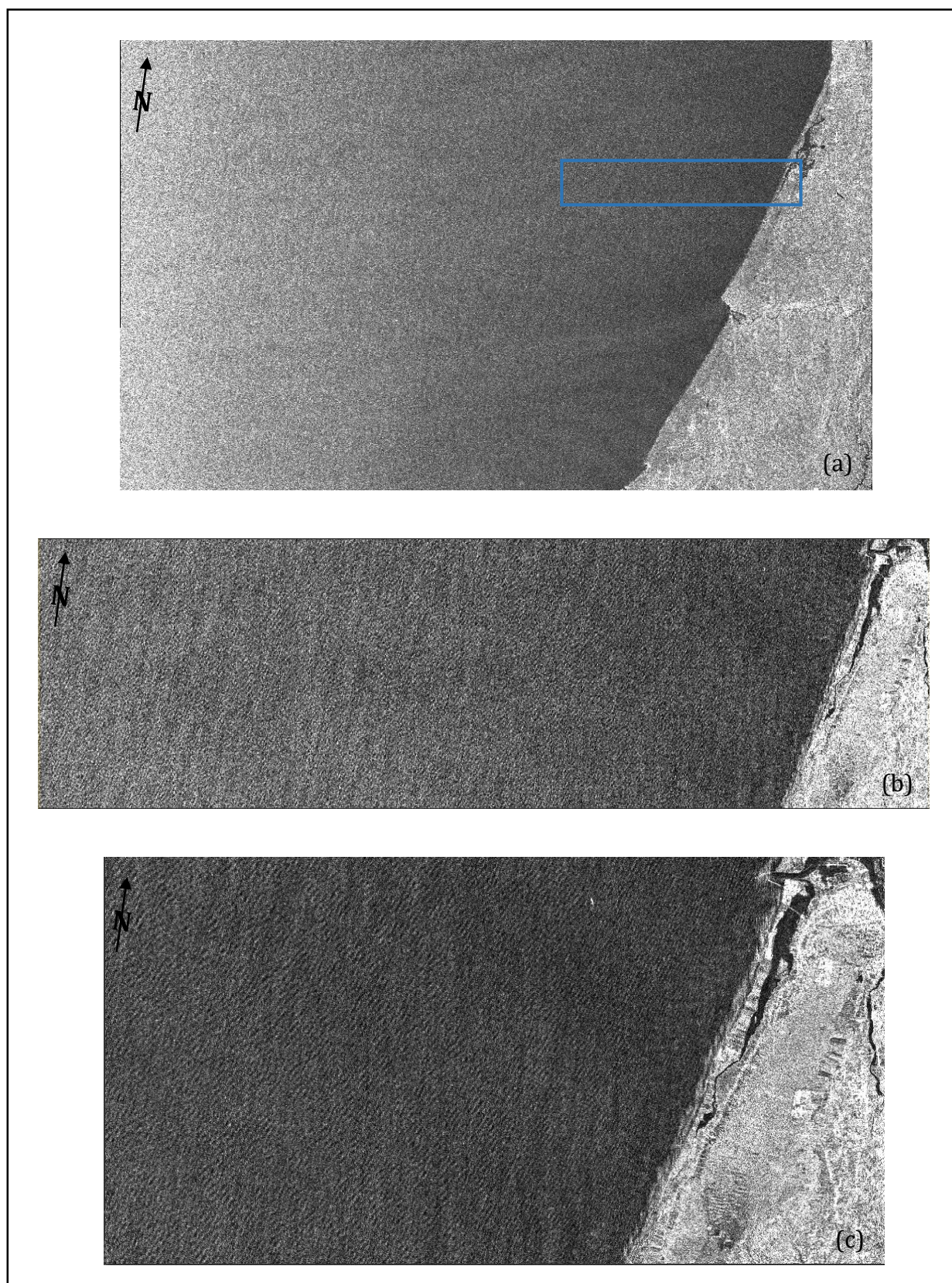


Figura 2 - Secções referentes à imagem *2ece*. (a) Imagem *2ece* total, em que o retângulo azul limita a área da subimagem ao largo. (b) Subimagem *2ece* – domínio ao largo. (c) Subimagem *2ece* – domínio junto à costa

Anexo 6

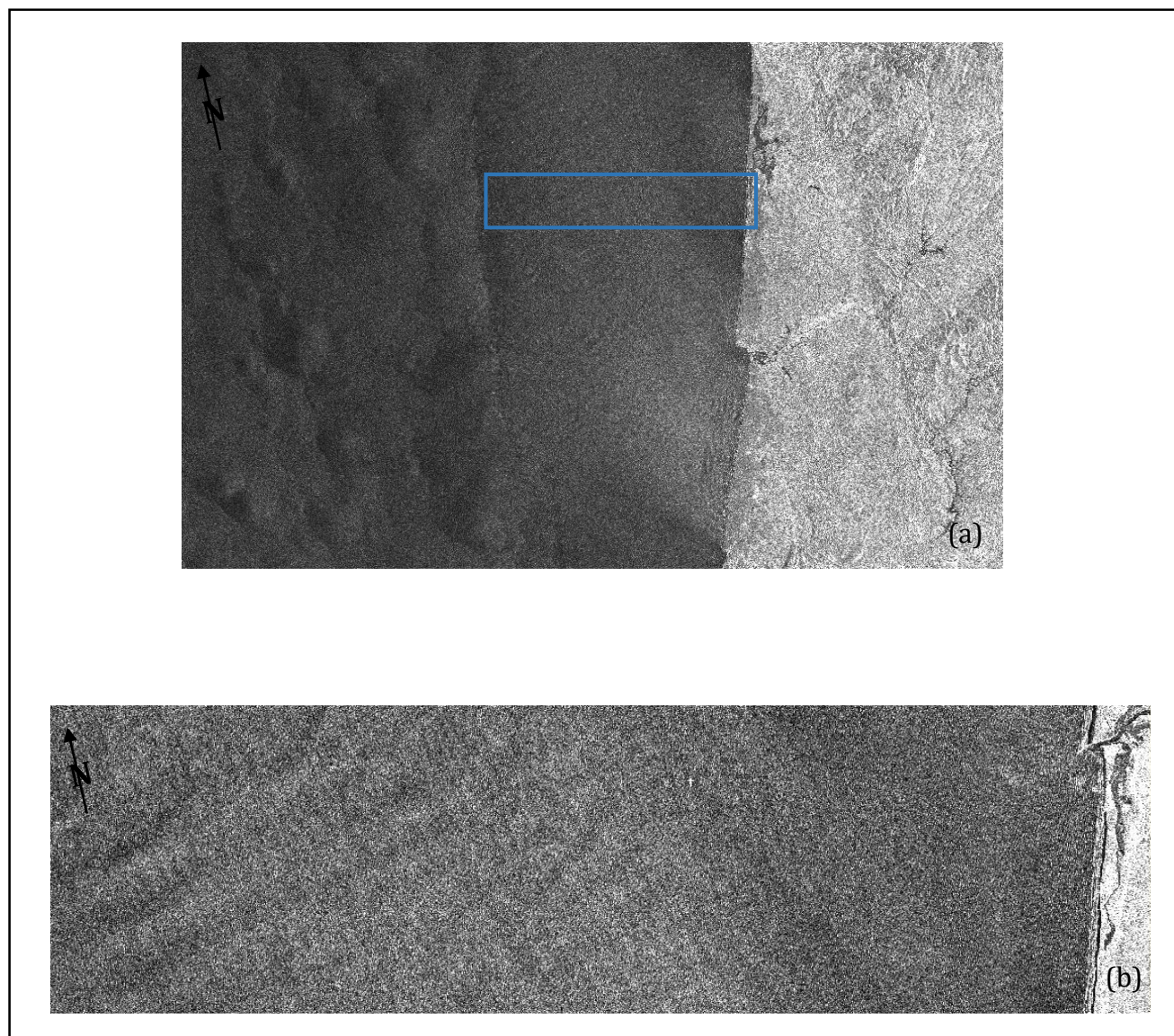


Figura 3 - Secções referentes à imagem 6b42. (a) Imagem 6b42 total, em que o retângulo azul limita a área da subimagem ao largo. (b) Subimagem 6b42 – domínio ao largo.

Anexo 7

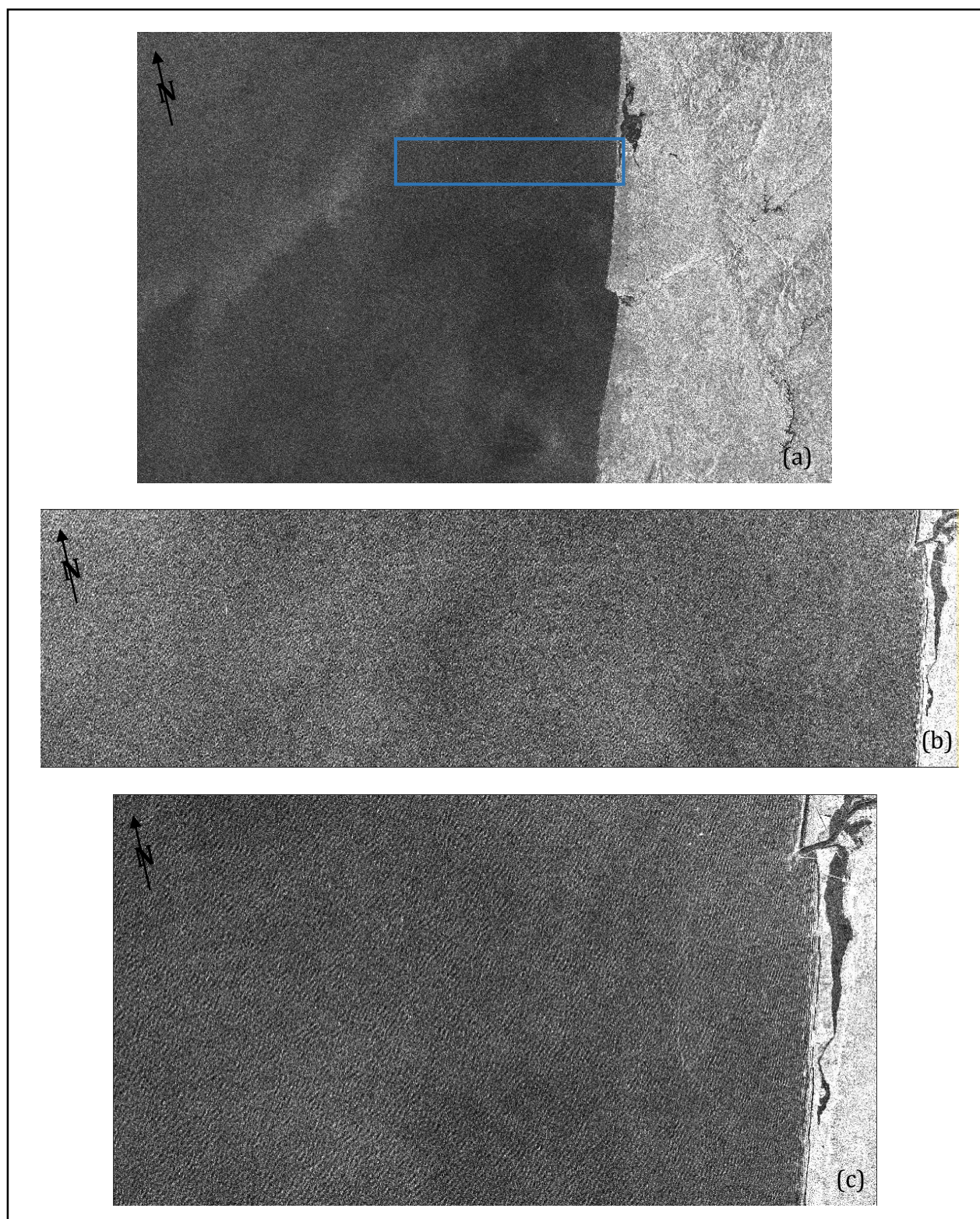


Figura 4 - Secções referentes à imagem 19a7. (a) Imagem 19a7 total, em que o retângulo azul limita a área da subimagem ao largo. (b) Subimagem 19a7- domínio ao largo. (c) Subimagem 19a7- domínio junto à costa